



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY**

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

**NÁVRH TOPOLOGIE KOMPOZITNÍHO
PIEZOKERAMICKÉHO SNÍMAČE**

PROPOSAL OF TOPOLOGY OF PIEZOCERAMIC COMPOSITE SENSOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Vojtěch Dostal

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Zdeněk Majer, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student: **Bc. Vojtěch Dostal**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Inženýrská mechanika a biomechanika
Vedoucí práce: **Ing. Zdeněk Majer, Ph.D.**
Akademický rok: 2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Návrh topologie kompozitního piezokeramického snímače

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce je zaměřena na numerickou analýzu již existujícího kompozitního piezokeramického prvku pro snímání vibrací a případnou úpravu topologie vláken a konstrukce jednotlivých vrstev. Obecně je snahou stále zdokonalovat/zefektivňovat prvky pro snímání vibrací a generování elektromechanického signálu. Tyto aktivní snímací prvky je vhodné využít v moderních strojích a zařízeních pro monitorování dynamiky zátěžných stavů. Příkladem aplikace těchto snímacích prvků může být integrace a dynamická analýza přejezdu železniční soupravy na daném místě trati.

Cíle diplomové práce:

Cílem této diplomové práce je vytvoření numerického modelu kompozitního piezokeramického snímače a porovnání numerických výpočtů s experimentem pro daný typ a topologii vrstev.

Díličí cíle práce jsou následující:

- popis a literární rešerše existujících řešení konstrukce piezoelektrických kompozitních vrstev,
- vytvoření 3D numerického modelu snímače včetně porovnání jednotlivých topologií konstrukce,
- vytvořit model snímače implementovaný na kolejnici a analyzovat odezvu při přejezdu vlaku,
- porovnání výsledků získaných z numerického výpočtu a experimentu,
- navrhnout rozměry a pozici snímače na kolejnici.

Seznam doporučené literatury:

ANSYS Inc, ANSYS Release 18.1 User's Manual, Swanson Analysis Sys. Inc, Pennsylvania. 2016.

JONES, R. M.: Mechanics of Composite Materials, Taylor & Francis. 1998.

MACHŮ, Z.: Výpočtové modelování piezoelektrických vrstevnatých kompozitů a analýza jejich elektro-mechanické odezvy při harmonickém kmitání, diplomová práce. Brno. 2019.

BILGEN, O., A. ERTURK, D. J. INMAN: Analytical and Experimental Characterization of Macro-Fiber Composite Actuated Thin Clamped-Free Unimorph Benders. Journal of Vibration and Acoustics [online], 132(5), 051005. ISSN 07393717. 2010. Dostupné z: doi:10.1115/1.4001504.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a numerickým modelováním piezokeramického snímače, který je umístěn na kolejnici z důvodu generování elektrické energie pro bezdrátové senzory monitorující železniční dopravu a stav kolejí. Práce se dá rozdělit do tří oblastí. První část se věnuje teoretickým základům piezoelektrické přeměny a následně jsou uvedeny příklady použití piezoelektrického generátoru v železniční oblasti. Ve druhé části je provedena parametrická analýza na numerickém modelu pro zjištění vhodného umístění piezoelektrického generátoru na kolejnici, k tomu byl použit homogenizovaný model MFC snímače. Výsledky z numerického modelu byly následně porovnány s provedeným experimentem. Třetí část se již věnuje návrhu vlastního piezokeramického snímače, který je aplikován na vybrané vhodné místo na kolejnici. Výsledky z provedeného numerického výpočtu ukazují vhodnost použití tohoto snímače pro monitorování železnice.

Abstract

This master thesis deals with design and numerical modelling of piezoceramic sensor, which is placed on a rail, in order to generate electrical energy, which can be used for wireless monitoring of railway traffic and to monitor the condition of the railway. The thesis is divided into three parts. Theoretically background of piezoelectric energy harvesting is described in first part, where some previous application of piezoelectric generator in railway area are shown. In the second part, parametric analysis of numerical model is performed, which directly leads to finding best location on a rail, where piezoelectric generator should be placed. For this analysis the homogenized model of MFC sensor was used. Results of the numerical model were then compared with the results of the conducted experiment. The third part presented own design of piezoceramic sensor, which is placed onto most suitable location on a rail. Results from numerical analysis shown eligibility of using piezoceramic sensor to monitor the railway traffic.

Klíčová slova

Energy harvesting, piezoelektrické materiály, kompozity, MFC, železnice, Ansys, numerický model, parametrická studie, elektrické napětí, elektrický výkon

Keywords

Energy harvesting, piezoelectric materials, composites, MFC, rail, Ansys, numerical model, parametric study, voltage, electric power

Bibliografická citace

DOSTAL, Vojtěch. *Návrh topologie kompozitního piezokeramického snímače*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124590>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Ing. Zdeněk Majer, Ph.D.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma "Návrh topologie kompozitního piezokeramického snímače" vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně dne 26. 6. 2020

.....

Vojtěch Dostal

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat mému vedoucímu práce Ing. Zdeňku Majerovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce a také za vstřícnost při konzultacích. Další díky také bude patřit doc. Ing. Zdeňku Hadašovi, Ph.D., který mi svými radami pomohl při prováděných analýzách na numerickém modelu. Za poskytnutí výsledků z experimentálního měření bych chtěl poděkovat Ing. Filipovi Kšicovi. Dále bych chtěl poděkovat svému kamarádovi Ing. Rostislavu Brhlíkovi za jeho připomínky k formálním náležitostem a úpravě diplomové práce.

Obsah

1 Úvod	10
2 Analýza řešeného problému.....	11
2.1 Popis problémové situace.....	11
2.2 Formulace problému	11
2.3 Cíle práce.....	12
2.4 Systém podstatných veličin.....	12
2.5 Výběr metody pro řešení problému.....	13
3 Úvod do problematiky piezoelektrické přeměny energie.....	14
3.1 Princip piezoelektrického jevu	14
3.2 Piezoelektrické materiály	15
3.2.1 Krystaly.....	17
3.2.2 Keramika.....	17
3.2.3 Polymery.....	17
3.2.4 Kompozity	18
3.3 Popis vlastností piezoelektrických látek	20
3.3.1 Matematický popis.....	21
3.3.2 Piezoelektrické konstanty	21
3.4 Modelování piezoelektrického efektu v programu ANSYS	23
4 Současný stav v oblasti snímání a zisku energie na železniční trati pomocí piezoelektrické přeměny.....	25
4.1 Rail-borne piezoelektrický generátor	25
4.2 Stack-type piezoelektrický generátor	26
4.3 Drum piezoelektrický generátor	28
5 Homogenizace MFC kompozitu	30
5.1 Model elementární buňky MFC	30
5.2 Ověření homogenizovaných materiálových vlastností	32
6 Analýza vhodného umístění, natočení vláken a velikosti MFC	34
6.1 Numerický model.....	34
6.1.1 Popis použitých konečno-prvkových elementů	34
6.1.2 Dynamické vlastnosti kolejového svršku	36
6.1.3 Model materiálu.....	37
6.1.4 Model geometrie.....	38
6.1.5 Okrajové podmínky	40

6.2	Modální analýza.....	41
6.3	Harmonická analýza	42
6.3.1	Výsledky harmonické analýzy	43
6.4	Zhodnocení analýzy a výběr konfigurace MFC	45
7	Porovnání numerického modelu s experimentem	47
7.1	Popis experimentu	47
7.2	Výsledky experimentu	47
7.3	Tranzientní analýza.....	49
7.3.1	Výsledky tranzientní analýzy	51
7.3.2	Vliv rychlosti vlaku.....	52
7.4	Porovnání experimentu s tranzientní analýzou.....	53
7.5	Výsledky pro vhodnou konfiguraci MFC.....	54
8	Návrh piezokeramického snímače	55
8.1	Struktura piezokeramického snímače	55
8.2	Tranzientní analýza.....	56
8.2.1	Výsledky tranzientní analýzy	57
8.2.2	Porovnání piezokeramického snímače s MFC	59
8.3	Zhodnocení piezokeramického snímače.....	60
9	Závěr.....	62
	Seznam použité literatury	64
	Seznam obrázků	67
	Seznam tabulek	69
	Seznam použitých symbolů, veličin a zkratk	70
	Přílohy	72

1 Úvod

V současné době, kdy se ve světě nachází obrovské množství elektrických zařízení, je potřeba získávat neustále větší množství elektrické energie, abychom mohli tato zařízení napájet. Největší podíl na zisku elektrické energie mají stále fosilní paliva, ale v současné době je snaha o získání energie pomocí obnovitelných zdrojů či jiných alternativních forem. Nejznámějšími zdroji v této oblasti jsou bezpochyby vítr, voda nebo slunce. Jsou zde ale i další zajímavé způsoby získání energie, které dokáží využít i jinak zmařenou kinetickou energii v podobě vibrací nebo kmitání. Tyto vibrace mohou být způsobeny např. provozem strojů, rotací turbín, přejezdem aut po mostě, průjezdem vlaku po kolejnici nebo dokonce pohybem lidského těla.

Zařízení, které slouží pro převod mechanické energie na elektrickou, se nazývají energy harvestry a v současné době se jim dostává velké pozornosti od inženýrů. Tato zařízení mohou využívat různé fyzikální jevy k přeměně energie, např. piezoelektrický, magnetostrikční, elektromagnetický nebo elektrostatický jev. Podle aplikace je zvolen vhodný fyzikální jev pro přeměnu energie. Velkou výhodou takovéto přeměny energie je schopnost vytvořit zařízení, jež může být autonomní, tedy bude se samo napájet jen pomocí vzniklých vibrací.

Tato práce se bude zabývat problematikou přeměny energie pomocí piezoelektrického jevu. Typická konstrukce piezoelektrického energy harvestru je znázorněna na Obr. 1, jež se skládá ze substrátu, na který je připevněna tenká piezoelektrická fólie, a ke které jsou namontovány elektrody. Nejrozšířenějším piezoelektrickým materiálem je v současnosti pravděpodobně keramika PZT, jelikož má velmi dobré piezoelektrické vlastnosti a přijatelnou cenu. Mezi její nevýhody ale patří křehkost a malá poddajnost, tudíž si musíme dávat pozor, aby nedošlo k porušení.



Obr. 1 Příklad piezoelektrického senzoru [1]

Nevýhody, které má spojitá PZT vrstva do jisté míry odstraňuje kompozitní materiál, jehož struktura se skládá z PZT vláken a polymerní matrice. Takto vyrobené piezokeramické kompozity mají mnohem větší flexibilitu, tudíž je lze využít i na zakřivené plochy nebo místa, kde dochází k velkým deformacím a přitom zůstávají zachovány dobré piezoelektrické vlastnosti. Následně je možné skládat jednotlivé kompozitní vrstvy do vícevrstvé struktury, kde je možné vhodnou skladbou vrstev dosáhnout ještě lepších výstupních hodnot na elektrodách. Touto problematikou se tedy bude zabývat tato diplomová práce. Popisuje integraci kompozitního piezokeramického snímače do daného místa na železniční trati, kde se bude následně analyzovat odezva při průjezdu vlaku.

2 Analýza řešeného problému

2.1 Popis problémové situace

V dnešní době představuje jeden z nejběžněji používaných materiálů v oblasti energy harvesting piezokeramika (konkrétně PZT – *Lead Zirconate Titanate*). Pro získání elektrické energie se u ní využívá změny mechanické energie např. kmitání, náhodné vibrace. Piezokeramika prokazuje velmi dobré piezoelektrické vlastnosti, ale jak tomu bývá, tak každé klady s sebou nesou i záporné vlastnosti, jež se u piezokeramiky projevují vysokou křehkostí a nízkou pevností. Aby se tyto negativní vlastnosti eliminovaly, byly proto vynalezeny piezokeramické kompozity. Jejich struktura se skládá z PZT vláken zapuštěných do epoxidové matrice. Dále se mohou jednotlivé kompozitní vrstvy skládat na sebe a to zpravidla tak, aby směry vláken byli odlišné, tím vznikají vícevrstvé piezokeramické kompozity. Následně se piezokeramické vrstvy zapustí do ochranných vrstev, což vede k vylepšení mechanických vlastností. Při výrobě vícevrstevných struktur bude kompozit obsahovat tepelná zbytková napětí v důsledku výrobního procesu, což povede ke zvýšení lomové houževnatosti.

Tyto piezokeramické kompozity lze poté implementovat do různých stavebních konstrukcí, strojních součástí či zařízení, kde budou monitorovat stav (tzv. Structural Health Monitoring) nebo budou schopny vyrábět elektrickou energii (tzv. Energy Harvesting). Právě díky piezoelektrickým vlastnostem dokáže kompozit vytvořit potřebné množství elektrické energie pro napájení potřebného senzoru. Výhodou je, že je možné umístit senzor i na místa, odkud není možné informace ze senzoru získat kabelem. Proto ale musí být energetický zisk z piezoelektrického generátoru dostatečný, aby mohl napájet i bezdrátovou vysílací jednotku, která bude odesílat naměřená data do centrály, kde bude vyhodnocován stav konstrukce. Abychom dostali potřebná data o stavu konstrukce, je zásadní pozice, kam piezokeramický snímač připevníme. O tom, kolik je možno získat elektrické energie a zda bude dostatečná pro napájení, rozhoduje i skladba kompozitu.

2.2 Formulace problému

Tato diplomová práce se zabývá návrhem piezokeramického kompozitu, skladby jednotlivých vrstev a nalezení správného místa pro aplikaci na kolejnici tak, aby byl získán elektrický zisk dostatečný pro napájení bezdrátového senzoru. Na začátku je nutné znát současný stav v oblasti konstrukcí piezokeramických kompozitních vrstev, k tomu je potřeba objasnit princip piezoelektrického jevu a také pochopit teorii kompozitních materiálů. Následně bude vytvořen numerický model piezokeramického snímače v prostředí ANSYS a porovnání jednotlivých topologií pomocí série harmonických analýz. Vybraný piezokeramický senzor se následně implementuje na kolejnici. Abychom dokázali vytvořit numerický model, je potřeba nastudovat problematiku piezoelektrických přeměn, k čemuž nám poslouží manuál od společnosti ANSYS. Numerické výsledky poté srovnáme s dostupnými experimentálními výsledky. Jakmile bude ověřen numerický model snímače, bude možné provést optimalizaci rozměrů snímače a jeho umístění na kolejnici, tak abychom vyhověli požadavkům na napájení bezdrátového senzoru a hlavně aby tento senzor podle technických norem pro železniční komunikace nebyl umístěn na zakázané místo na kolejnici.

2.3 Cíle práce

K vyřešení problémů formulovaných v předchozí kapitole bude potřeba provést následující úkoly, které jsou zároveň i cíli této práce:

- Provést literární rešerši existujících konstrukcí piezoelektrických kompozitních vrstev a jejich aplikace v řešené problematice.
- Vytvořit numerický model MFC snímače a provést jeho implantaci na kolejnici.
- Následně provést topologickou analýzu, při které se bude zjišťovat odezva při průjezdu vlaku při různých konfiguracích MFC snímače.
- Porovnat numerické výsledky s dostupnými experimentálními výsledky.
- Navrhnout rozměry piezokeramického snímače a jeho pozici na kolejnici a provést srovnání.

2.4 Systém podstatných veličin

Důležitým krokem, který slouží ke správnému posouzení problému a výběru vhodné metody řešení, je vytvoření si systému podstatných veličin. Díky tomu nezapomeneme na žádnou podstatnou skutečnost, která je spojena s řešeným problémem. Pro tuto práci je objektem zájmu piezokeramický kompozitní snímač, který bude implementovaný na kolejnici. Podle [2] systém podstatných veličin obsahuje následující kategorie:

- S0 – okolí objektu

Okolí objektu představuje entity, ke kterým je objekt zájmu připevněn. V této práci je podstatnou entitou kolejnice, na kterou bude objekt připevněn a prvky kolejového svršku. Další entitou v okolí objektu je vzduch, ale ten je pro řešení problému nepodstatný.

- S1 – geometrie a topologie objektu

Důležité jsou rozměry a natočení jednotlivých vrstev piezokeramického kompozitu a jeho celková tloušťka. Dále hraje roli, jak jsou na sebe jednotlivé vrstvy naskládány a kolik jich tam je. V neposlední řadě je také důležité umístění piezokeramického kompozitu na kolejnici, protože to ovlivňuje velikost přetvoření.

- S2 – podstatné vazby objektu v okolí

Podstatnými vazbami se myslí přichycení objektu k okolí. V této práci je vazba mezi objektem a kolejnicí realizována přilepením objektu pomocí epoxidového lepidla. Toto spojení bude uvažováno jako ideálně tuhé a nepohyblivé. Nachází se zde ještě jedna vazba objektu a tu představují elektrody, které odvádí vzniklý elektrický náboj na objektu.

- S3 – aktivace objektu z okolí

Objekt pevně spojený s kolejnicí je aktivován silou, která reprezentuje projíždějící vlak po kolejnici. Tato síla vyvolá časově harmonický průhyb kolejnice, jehož amplituda se bude tlumit vlivem vysoké tuhosti kolejnice a tuhosti dynamických prvků kolejového svršku. Průhyb kolejnice následně vyvolá určité přetvoření objektu.

- S4 – ovlivňování objektu z okolí

Objekt bude ovlivňovat připojená elektrická zátěž na elektrody. Dále by mohl mít určitý vliv vzduch v okolním prostředí, především jeho teplota a vlhkost. Ale v této práci se objekt nachází v okolním prostředí, kde tyto vlivy nebudou podstatné.

- S5 – vlastnosti prvků struktury objektu

Důležité vlastnosti u vícevrstevných struktur jsou tloušťka jednotlivých vrstev a jejich materiálové charakteristiky, a jelikož pracujeme s piezokeramikou, tak bude potřeba znát piezoelektrické vlastnosti. Charakteristiky, které je potřeba znát, jsou tedy modul pružnosti, Poissonův poměr, hustota a piezoelektrické konstanty. Tyto charakteristiky jsou nezbytné pro stanovení napjatosti ve vícevrstvé struktuře.

- S6 – procesy na objektech a jeho stavy

Objekt bude vlivem aktivace cyklicky namáhán, dokud nedojde k utlumení. Bude se měnit napjatost a přetvoření objektu, které mají zásadní vliv na piezoelektrický jev, který bude probíhat v objektu.

- S7 – projevy (chování) objektu

Proces, který probíhá v objektu, bude mít za následek generování elektrického napětí, které bude pomocí elektrod odváděno na zátěž.

- S8 – důsledky projevů

Jako pozitivní důsledek projevu bude, že vzniklo elektrické napětí, které může napájet určité zařízení, které může dále poskytovat informace o stavu. Jsou zde ale i negativní důsledky a těmi mohou být porušení objektu vlivem cyklického namáhání.

2.5 Výběr metody pro řešení problému

Řešený problém spadá do kategorie multifyzikálních úloh, protože se zde převádí mechanické veličiny na elektrické. Jelikož se jedná o poměrně složitou úlohu, není možné pomocí analytického řešení dojít k výsledku. Proto je nutné zvolit numerickou metodu, konkrétně metodu konečných prvků (MKP). Existuje řada softwarů, které dokáží řešit úlohy pomocí MKP. Z nich byl zvolen program od společnosti ASYNYS Inc., který dokáže řešit i složitější multifyzikální úlohy. Využívat se bude prostředí ANSYS Mechanical APDL, konkrétní verze 2019 R3. Tento software je také zvolen vzhledem k tomu, že je vyučován na ústavu mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky a je dostupný na FSI VUT.

3 Úvod do problematiky piezoelektrické přeměny energie

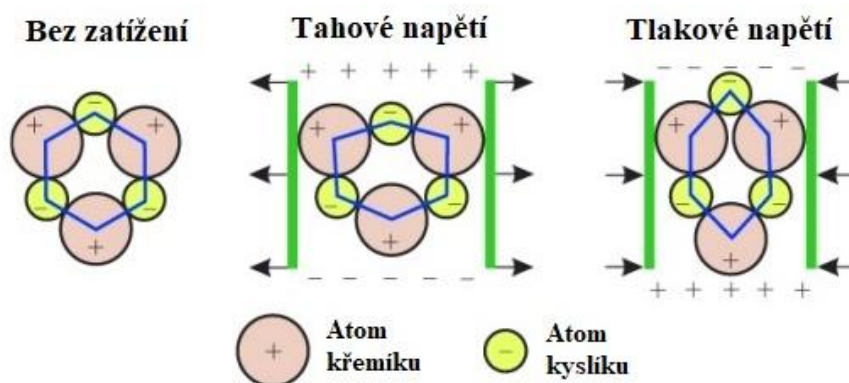
Piezoelektrický jev jako první objevili bratři Jacques a Pierre Curiové v roce 1880. Zjistili, že u některých typů krystalů při stlačení vzniká v určitém směru pozitivní a negativní náboj na povrchu těchto krystalů. Jakmile je krystal uvolněn, tak tento náboj zmizí. Není náhoda, že tento jev objevili, protože Pierre Cuire již předtím studoval problematiku pyroelektrického jevu a symetrii krystalů a byl tímto studiem výrazně ovlivněn, protože tato problematika je velmi podobná piezoelektrickému jevu. Název „piezo“ pochází z řeckého slova *piezein*, což v překladu znamená tlačit. [3] [4]

Nejprve se jim podařilo objevit přímý piezoelektrický jev na krystalu turmalínu. Všimli si, že při působení tlaku v určitém směru vzniká na opačných površích elektrický náboj úměrný velikosti tlaku. Později se jim to podařilo objevit i u křemene a dalších krystalů, které neměly střed symetrie. O rok později, v roce 1881, Gabriel Lippmann předpověděl na základě termodynamických principů, že by tento jev mohl fungovat i obráceně. Vložení piezoelektrického krystalu do elektrického pole by mělo způsobit deformaci krystalu, tuto hypotézu poté experimentálně potvrdili bratři Curiové a jev byl nazván jako nepřímý piezoelektrický jev. [3]

Piezoelektrické vlastnosti jednotlivých materiálů jsou závislé na uspořádání krystalové mřížky. Tyto souvislosti již zčásti zavedli bratři Curiové, ale teprve až v roce 1894 Woldemar Voight stanovil všechny souvislosti. Existuje celkem 7 krystalografických soustav, které lze podle vnitřního uspořádání atomů rozdělit do 32 krystalových tříd. Voight dokázal, že lze u 18 z nich využít piezoelektrického jevu, protože se jedná o soustavy bez středu symetrie. [5]

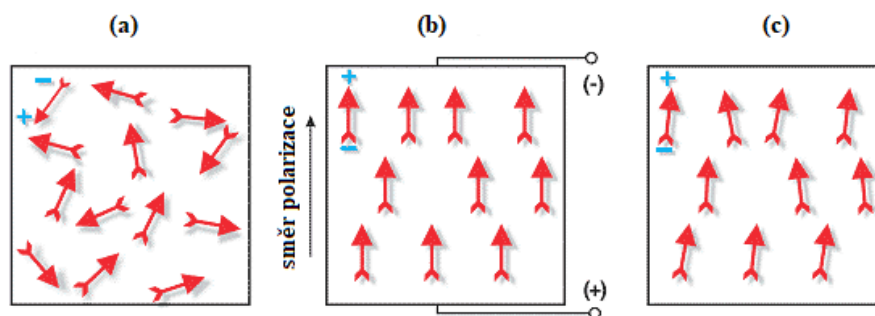
3.1 Princip piezoelektrického jevu

Princip fungování přímého piezoelektrického jevu je jednoduše nastíněn na Obr. 2. Piezoelektrický krystal, v tomto případě křemen, ale u dalších krystalů to bude fungovat totožně, se skládá ze vzájemně propojených domén (kladné a záporné náboje). Tyto domény jsou uvnitř krystalu symetrické, takže se krystal jako celek chová elektricky neutrálně. K piezoelektrickému jevu dochází ve chvíli, kdy je narušena rovnováha krystalové mřížky. Ta může být způsobena tahovým nebo tlakovým působením na krystal, to má pak za důsledek deformaci krystalové mřížky, jež vyvolá nerovnováhu náboje, tzv. elektrický dipól. [6]



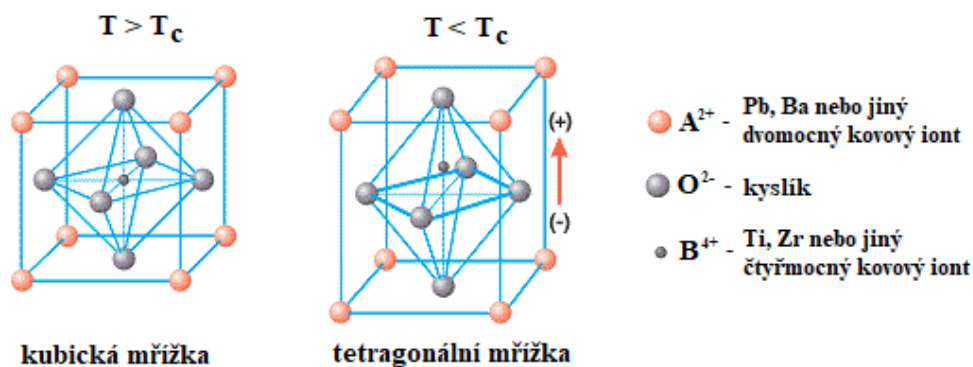
Obr. 2 Princip přímého piezoelektrického jevu u krystalu křemene [6]

Piezoelektrický materiál se skládá z velkého množství elektrických dipólů, které jsou ale v materiálu orientovány různými směry, podle toho aby zaujímaly nejmenší celkovou elektrickou i mechanickou energii. Pokud bychom takto uspořádaný materiál vystavili mechanickému namáhání, piezoelektrický efekt by se neuskutečnil, protože dipóly nemají stejnou orientaci. Abychom docílili stavu, kdy budou mít všechny dipóly stejný směr, tak musíme provést nejprve polarizaci, jejíž postup zachycuje Obr. 3. Jakmile přestane působit elektrické pole, tak se dipóly zarovnají do pozic blízkých stavu při polarizaci. Tento materiál je již trvale polarizovaný a dipóly zůstanou trvale srovnány. [7]



Obr. 3 Orientace elektrických dipólů (a) s náhodným uspořádáním, (b) během polarizace, (c) po polarizaci [7]

U polarizovaných piezoelektrických látek pak musíme dávat pozor na to, aby nedošlo k jejich depolarizaci, kterou může způsobit dosažení Curieho teploty nebo působení elektrického pole v jiném směru než byla piezoelektrická látka polarizována. Důsledkem překročení Curieho teploty je změna krystalové mřížky, jak lze vidět na Obr. 4. Toto chování je typické pro piezokeramické materiály. Krystalická mřížka se z nesymetrické stává symetrickou a to pro získ elektrické energie pomocí piezoelektrického jevu není možné. [7]



Obr. 4 Vliv Curieho teploty na polarizaci piezokeramiky [7]

3.2 Piezoelektrické materiály

Existuje široká řada materiálů, které vykazují piezoelektrické chování, patří mezi ně jak přírodní materiály, tak i materiály uměle vytvořené. Piezoelektrické materiály jsou v podstatě převodníky, které mění mechanickou energii na elektrickou (přímý piezoelektrický jev) a elektrickou energii na mechanickou (nepřímý elektrický jev). Díky těmto efektům nachází

velké uplatnění v oblasti průmyslového inženýrství a také v oblasti medicíny, podle povahy je můžeme dělit na 3 základní skupiny, těmi jsou generátory, senzory a aktuátory. V Tab. 1 můžeme vidět přehled aplikací piezoelektrického materiálu v oblasti průmyslového inženýrství. V oblasti medicíny se piezoelektrických materiálů využívá pro monitorování krevního tlaku, monitorování srdečního rytmu, schopnost vytvoření obrazu při vyšetření ultrazvukem, měření hustoty kosti pomocí ultrazvuku nebo u kochleárního implantátu. [8]

Tab. 1 Aplikace piezoelektrických materiálů v oblasti průmyslového inženýrství [8]

Použitý piezoel. jev	Přeměna energie	Aplikace
přímý	vstupní: mechanická výstupní: elektrická	zapalovač tlakový senzor akcelerometr gyroskop mikrofon ultrazvukový senzor hydrofon (SONAR) hmatový senzor energy harvesting
nepřímý	vstupní: elektrická výstupní: mechanická	<i>nízko-frekvenční aplikace:</i> elektronické zvonky reproduktory piezoelektrické aktuátory <i>vysoko-frekvenční aplikace:</i> piezoelektrické motory piezoelektrické pumpy ultrazvukové vrtačky ultrazvukové čističky ultrazvukové generátory přijímač (SONAR)
oba - přímý i nepřímý	vstupní: mechanická/ elektrická výstupní: elektrická/ mechanická	krystalový oscilátor krystalový měřič zobrazování povrchu nedestruktivní testování pomocí ultrazvuku kontrola hluku a vibrací Structural Health Monitoring Smart zařízení a roboti

Piezoelektrické materiály lze rozdělit do následujících skupin:

- krystaly,
- keramika,
- polymery,
- kompozity.

3.2.1 Krystaly

Jedná se o monokrystaly, pro které je charakteristické, že se vyznačují svou pravidelnou strukturou v celém materiálu. Tento druh piezoelektrického materiálu může být přírodní nebo uměle vytvořený.

Do skupiny přírodních patří krystaly, na kterých bratři Curieové objevili piezoelektrický jev a to turmalín, dále topaz a Seignettova sůl. Mezi nejznámější přírodní krystaly patří křemen (SiO_2). Tyto krystaly jsou velmi stabilní ve frekvenční oblasti a při měnící se teplotě, ale jejich piezoelektrické vlastnosti jsou naopak velmi nízké. Proto se využívají spíše při aplikaci v komerčních oblastech. Jejich využití je např. v zapalovačích, elektrických hodinách, snímačích mechanických veličin a v oscilátorech. [9]

Další skupinou jsou uměle vytvořené krystaly, které se připravují z vodního roztoku za vysoké teploty a vysokého tlaku. Příkladem jsou tuhé roztoky PMN-PT a PZN-PT. Jejich piezoelektrické vlastnosti jsou výborné, jelikož převyšují i piezokeramiku PZT. Avšak jejich výroba není příliš jednoduchá, proto se v energy harvesting uplatňuje méně než piezokeramika PZT. Tyto materiály se dají využívat jako senzory, aktuátory, při nedestruktivním testování nebo při vyšetření ultrazvukem. [11]

3.2.2 Keramika

Keramika je nejpoužívanějším piezoelektrickým materiálem v dnešní době, jelikož má velmi dobré piezoelektrické vlastnosti. Další výhodou je poměrně nízká výrobní cena a lze vyrábět různé tvary. Na druhou stranu má ale i značné nevýhody a tou je vysoká křehkost a poměrně nízká Curieho teplota. Nejběžnějším piezokeramickým materiálem je sloučenina PZT, která má anglický název *Lead zirconate titanate*. Jedná se o anorganickou sloučeninu na bázi tuhých roztoků oxidů PbZrO_3 (PZ) a PbTiO_3 (PT). Obecně má chemickou formuli $\text{Pb}[\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x}]\text{O}_3$, kde x je od 0 do 1. Bylo prokázáno, že hodnota x rovnající se přibližně 0,5 maximalizuje piezoelektrický jev [13]. Mezi další piezokeramické materiály se také řadí bezolovnatá sloučenina BaTiO_3 .

Piezokeramiku lze rozdělit podle [14] do dvou kategorií. Měkká piezokeramika se vyznačuje dobrou pohyblivostí doménových stěn, proto může být polarizována při slabším elektrickém poli a nižších teplotách. Její piezoelektrické charakteristiky dosahují vyšších permitivit, větších piezoelektrických konstant, vyšších dielektrických ztrát, ale naopak mají nižší činitel jakosti. Tvrdá piezokeramika má doménové stěny pevně fixovány, proto potřebuje silnější elektrické pole a vyšší teploty pro dosažení stabilnější polarizace. Piezoelektrické charakteristiky jsou přesně opačné než u měkké piezokeramiky.

3.2.3 Polymery

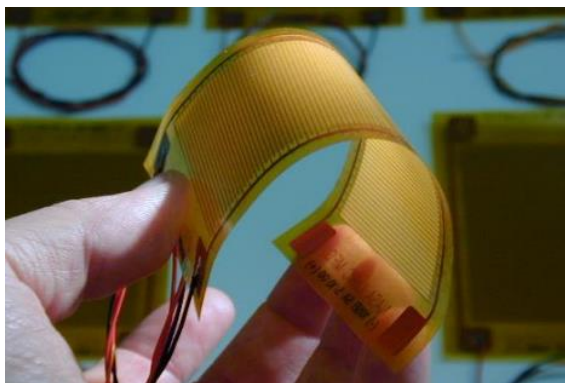
Polymery, které se používají jako piezoelektrické látky, mají velmi dobré mechanické vlastnosti, jelikož jsou pružné, houževnaté a biokompatibilní. Díky těmto vlastnostem se hodně využívají v biomedicínské oblasti. Na druhou stranu mají polymery i velké nevýhody a to nízké piezoelektrické konstanty a nutnost velkého elektrického pole pro polarizaci, proto se v oblasti průmyslovém odvětví moc neuplatňují. [10]

Nejběžnějším a nejpoužívanějším polymerem je poly-vinyliden-fluorid (PVDF). Jedná se o polykrystalický polymer, který se vyskytuje ve čtyřech fázích α , β , γ a δ . Jediný β -fázový PVDF se používá jako piezoelektrický materiál, jelikož v jeho struktuře se atomy vodíku a fluoru nachází na protilehlých stranách a tak dokáží vytvořit nenulový dipól, který je potřeba k tomu, aby nastal piezoelektrický efekt. [12]

Další větší skupinou piezoelektrických polymerů jsou materiály označované VCP (voided charged polymers). Jejich princip je založen na tvorbě dutin uvnitř polymeru, jež se vytváří různými typy plynu, nejčastěji vzduchem, dusíkem nebo pomocí CO_2 . Piezoelektrické vlastnosti poté záleží na rozložení a velikosti dutin. Dobré vlastnosti má pak porózní polymer polytetrafluoretylen (PTFE). [12]

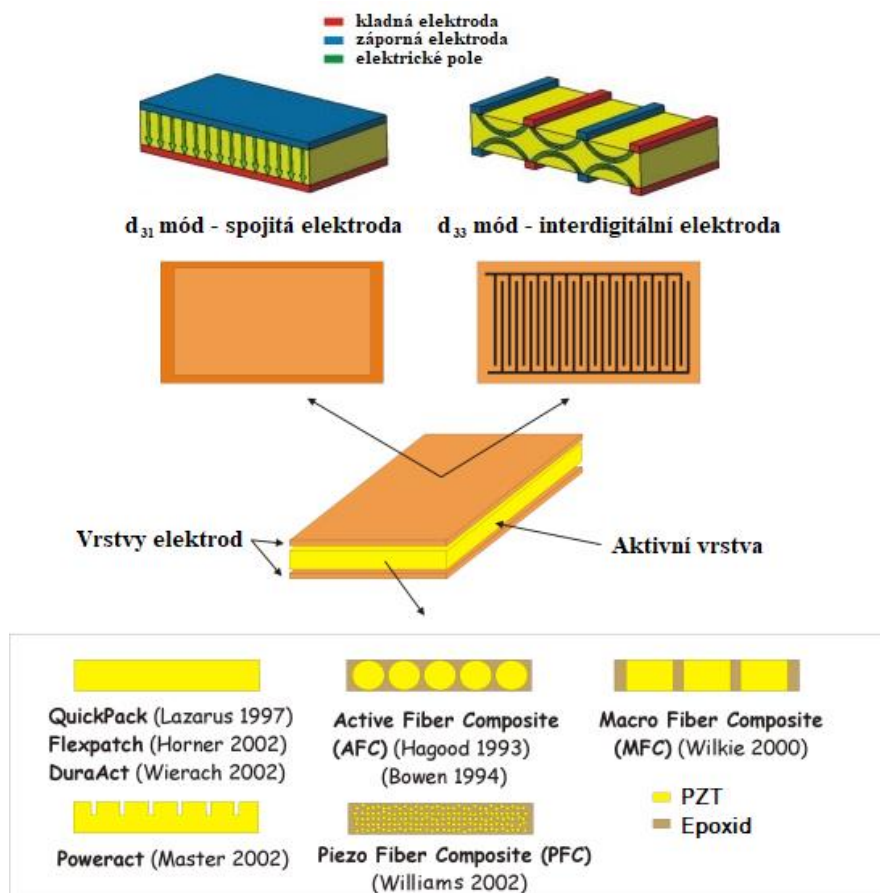
3.2.4 Kompozity

Velký problém u piezoelektrických materiálů, zejména krystalů a keramiky, je vysoká křehkost a nízká flexibilita, díky níž nelze tyto materiály připevnit k zakřiveným strukturám. Abychom dokázali tyto nepříznivé charakteristiky eliminovat, byly vyvinuty dvě techniky, které vedou ke zlepšení celkových vlastností. První možností je přilepení tenké vrstvy (filmu) PZT k substrátu pomocí spékání, ale tento proces vyžaduje minimální teploty $900\text{ }^{\circ}\text{C}$. Toto může vést k delaminaci díky následnému ochlazování. Druhou možností je použití zabalených piezokeramických kompozitů do ochranné vrstvy, které jsou tvarově flexibilní, a proto mohou být přilepeny k zakřiveným povrchům (viz Obr. 5). [16]



Obr. 5 Příklad MFC aktuátoru [17]

Typický piezokeramický kompozit je vyroben z aktivní vrstvy vložené mezi dvě tenké ochranné vrstvy, v nichž je zavedena elektroda určitého tvaru (viz Obr. 6). Tyto vrstvy také mohou posloužit k vytvoření předpětí v aktivní vrstvě, tudíž dokáže zabránit tvorbě trhlin. Aktivní vrstva se může skládat pouze z jednolitě PZT keramiky nebo z kombinace PZT vláken a epoxidové matrice. Elektrody uvnitř vrstvy mohou být buď spojitě, v takovém případě se elektrický potenciál vytváří mezi spodní a vrchní elektrodou a vzniká spojitě elektrické pole kolmé na rovinu kompozitu. V roce 1993 přišel Hagood a kol. s návrhem interdigitální struktury, kdy se střídá kladná a záporná elektroda v obou vrstvách. Při takovéto konfiguraci elektrod vzniká zakřivené elektrické pole, které směřuje ve směru vláken. V prvním případě pracuje piezokeramický materiál v módu d_{31} , zatímco v druhém případě se jedná o mód d_{33} , u kterého jsme schopni dosáhnout větších napětí, ale i přetvoření musí být větší. [15]

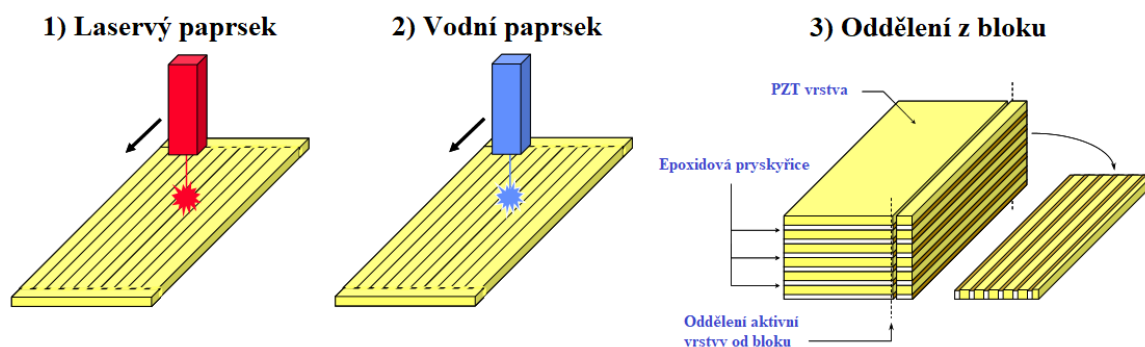


Obr. 6 Struktura piezokeramického kompozitu [15] [16]

Piezokeramických kompozitů existuje velká řada, všechny jsou ale založeny na stejném principu, liší se především konfigurací elektrod a typem aktivní vrstvy (tvar vláken). Různé typy piezokeramických struktur i s autory, kteří tento typ kompozitu vynalezli, lze vidět v přehledu dole na Obr. 6. Významnou skupinu kompozitů tvoří zejména AFC (Active Fiber Composite) a MFC (Macro Fiber Composite), kdy jejich rozdíl je jen ve tvaru použitých vláken.

AFC kompozit byl vytvořen v roce 1993 na MIT [17] a aktivní vrstva se skládá z PZT kruhových vláken, která jsou méně účinná díky svému tvaru. Problém spočívá v tom, že elektrody se PZT vláken dotýkají pouze na malé ploše a je zde velký objemový podíl epoxidu, který díky své malé relativní permitivitě snižuje velikost elektrického pole, což vede k menší efektivitě přeměny. Díky tvaru vláken je komplikovanější a nákladnější výroba tohoto kompozitu. Naopak tento typ kompozitu se vyznačuje vysokou hustotou náboje, dlouhou životností a je schopen odolat většímu namáhání. [16]

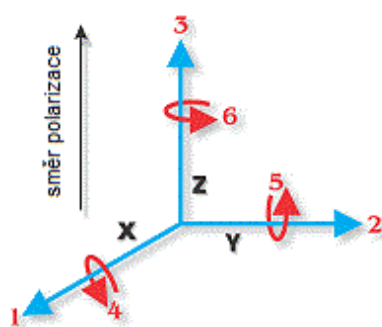
MFC kompozit byl poprvé vytvořen v roce 2000 v NASA [16]. Jeho struktura vychází z AFC kompozitu pouze je jiný tvar aktivní vrstvy skládající se z PZT vláken mající čtvercový nebo obdélníkový tvar. Díky svému tvaru jsou proto účinnější než předchozí typ AFC, jelikož je zde styková plocha mezi PZT vláknem a elektrodou mnohem větší. Díky tvaru vláken je mnohem jednodušší výroba než u AFC. MFC lze vyrábět třemi způsoby, první dva jsou si velmi podobné a spočívají ve vyřezávání PZT vláken z plátů pomocí laserového nebo vodního paprsku. Při třetím způsobu se na sebe postupně naskládají PZT pláty střídavě s epoxidovou pryskyřicí a odřízne se rovnou celý blok vrstvy MFC. Všechny tyto postupy lze vidět na Obr. 7



Obr. 7 Způsob výroby MFC kompozitu [17]

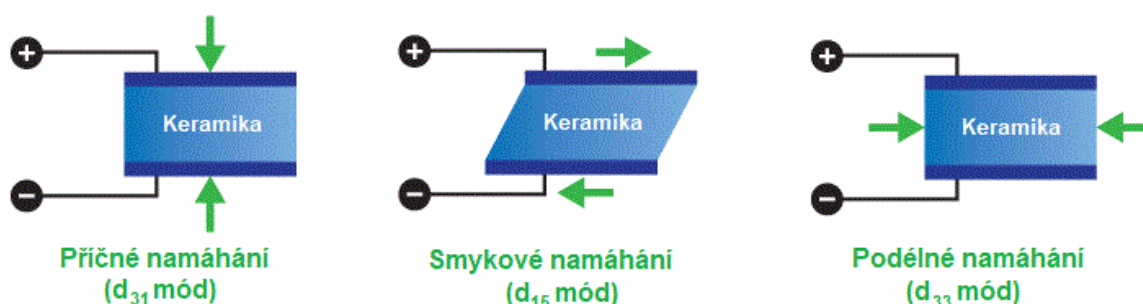
3.3 Popis vlastností piezoelektrických látek

Piezoelektrický efekt je děj, při němž dochází k interakci mezi mechanickým a elektrickým chováním materiálu. Tuto interakci popisují níže uvedené piezoelektrické konstanty. Vzhledem k anizotropnímu chování materiálu má proto každá konstanta obecně dva indexy ij . První index určuje směr polarizace, které podle konvencí směřuje v kladném směru osy z . Druhý index označuje osu, ve které se těleso deformuje. Pro popis směrů u piezoelektrických látek se užívá konvence značení, která je dána normou ANSI/IEEE Std 176-1987 [19], jejíž grafické znázornění vidíme na Obr. 8. [20]



Obr. 8 Základní značení směrů [20]

Obr. 9 zobrazuje tři základní módy namáhání, ve kterých se mohou piezoelektrické materiály používat.



Obr. 9 Základní módy namáhání piezokeramické látky [21]

3.3.1 Matematický popis

Z důvodu anizotropních vlastností piezoelektrických materiálů se pro matematický popis chování užívá obecných konstitutivních vztahů, které mají tvar podle [13]:

$$\mathbf{S} = \mathbf{s}^E \cdot \mathbf{T} + \mathbf{d}^T \cdot \mathbf{E} \quad (3.1)$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{d} \cdot \mathbf{T} + \boldsymbol{\varepsilon}^T \cdot \mathbf{E} \quad (3.2)$$

kde \mathbf{S} je mechanické přetvoření, \mathbf{D} je elektrické indukce, \mathbf{T} je mechanické napětí, \mathbf{E} je intenzita elektrického pole, \mathbf{s}^E je elektrická poddajnosti při konstantní intenzitě elektrického pole \mathbf{E} , \mathbf{d}^T a \mathbf{d} jsou nábojové konstanty, kde index T značí transponovanou matici \mathbf{d} , $\boldsymbol{\varepsilon}^T$ je permitivita při konstantním napětí T .

Dále lze rovnice (3.1) a (3.2) podrobněji rozepsat podle normy ANSI/IEEE Std 176-1987. Díky symetrii se mnoho prvků v maticích rovná nule. V zásadě jsou mechanické přetvoření a mechanické napětí tenzory 2. řádu (matice 3×3), ale díky symetrii se zredukuje na 6 unikátních prvků. Díky Voigtově notaci je lze přepsat na vektor nebo tenzor 1. řádu. [13]

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11}^E & s_{21}^E & s_{31}^E & 0 & 0 & 0 \\ s_{21}^E & s_{22}^E & s_{32}^E & 0 & 0 & 0 \\ s_{31}^E & s_{32}^E & s_{33}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44}^E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{55}^E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66}^E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{15} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{11}^T & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{11}^T & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Rovnice (3.1) a (3.2) vyjadřují obecné závislosti pro piezoelektrický materiál. Když ale tento materiál aplikujeme na nějaké místo, tak podle jeho použití bude namáhám pouze v jednom určitém módu. Tudíž je vhodnější tyto maticové rovnice pro obecný tvar přepsat do jednoduchého tvaru pro konkrétní zatěžovací mód. Můžeme si například uvést zjednodušené rovnice pro zatěžovací mód 31. [13]

$$S_1 = s_{11}^E \cdot \sigma_1 + d_{31} \cdot E_3^i \quad (3.5)$$

$$D_3^i = d_{31} \cdot \sigma_1 + \varepsilon_{33} \cdot E_3^i \quad (3.6)$$

3.3.2 Piezoelektrické konstanty

V této kapitole budou uvedeny konstanty, které popisují chování piezoelektrického materiálu. Jsou zde uvedeny vztahy pro jejich výpočet. Celá kapitola vychází ze stránek [20].

- **Nábojová konstanta** - d_{ij} [$\text{C} \cdot \text{N}^{-1}$]

Koeficient d_{ij} je definován jako poměr elektrického náboje generovaného na jednotku plochy k použité síle. Tato nábojová konstanta je proto důležitá při použití aktuátorů.

$$d_{ij} = k_{ij} \cdot \sqrt{s_{ij}^E \cdot \varepsilon_{ij}^T} \quad (3.7)$$

- **Napěťová konstanta** - g_{ij} [$\text{Vm} \cdot \text{N}^{-1}$]

Koeficient g_{ij} je definován jako poměr generovaného elektrického pole k aplikovanému mechanickému namáhání. Vysoké hodnoty g_{ij} jsou výsledkem produkce velkých výstupních napětí, která jsou nezbytná pro aplikace senzorů.

$$g_{ij} = \frac{d_{ij}}{\varepsilon_{ij}^T} \quad (3.8)$$

- **Permitivita** - ε_{ij} [$\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$]

Absolutní permitivita ε_{ij} vyjadřuje míru odporu při vytváření elektrického pole v určitém materiálu. Často bývá vyjadřována pomocí relativní permitivity ε_r , dříve také označována jako dielektrická konstanta K , která je definována jako poměr mezi absolutní permitivitou materiálu a permitivitou vakua. U piezoelektricky aktivních látek rozlišujeme dvě hodnoty permitivity,

- ε_{ij}^T je absolutní permitivita při konstantním mechanickém napětí,
- ε_{ij}^S je absolutní permitivita při konstantním mechanickém přetvoření.

$$K = \varepsilon_r = \frac{\varepsilon_{ij}}{\varepsilon_0} \quad (3.9)$$

- **Elastická poddajnost** - s_{ij} [Pa^{-1}]

Elastická poddajnost s_{ij} popisuje velikost přetvoření materiálu při působení jednotkového napětí. Jedná se o převrácenou hodnotu Youngova modulu pružnosti E_{ij} . U piezoelektricky aktivních látek rozlišujeme dvě hodnoty elastické poddajnosti,

- s_{ij}^E je elastická poddajnost při konstantní elektrické intenzitě,
- s_{ij}^D je elastická poddajnost při konstantní elektrické indukci.

- **Koeficient elektromechanické vazby** - k_{ij} [—]

Koeficient k_{ij} , respektive jeho druhá mocnina, určuje efektivitu přeměny mechanické energie na elektrickou a naopak. Hodnoty uvedené ve specifikacích materiálu jsou obvykle maximální, jelikož nezahrnují dielektrické a mechanické ztráty, takže skutečná účinnost přeměny bude vždy nižší.

$$k_{ij}^2 = \sqrt{\frac{E_i^{\text{elekt.}}}{E_j^{\text{mech.}}}} = \frac{d_{ij}^2}{s_{ij}^E \cdot \varepsilon_{ij}^T} \quad (3.10)$$

- **Mechanický činitel jakosti - Q_m [–]**

Činitel jakosti je bezrozměrná veličina, která popisuje míru mechanických ztrát u piezoelektrického generátoru. Čím je hodnota koeficientu vyšší, tím jsou menší ztráty, naopak když je hodnota vysoká, tak dochází k velkému tlumení.

- **Curieova teplota - T_c [K]**

Curieova teplota je charakteristickou vlastností feromagnetických a piezoelektrických látek. Jedná se o hraniční teplotu, nad kterou látky ztrácí své feromagnetické a piezoelektrické vlastnosti, protože dochází ke změně ve struktuře látky a krystaly získávají symetrickou strukturu.

Tab. 2 Piezoelektrické vlastnosti některých piezoelektrických materiálů [22]

	BaTiO ₃	PZT-4	PZT-5A	PZT-5H	PZT-8	PVDF	PMN-33%PT	PZN-6%PT
d_{33} [pC/N]	-78	-123	-171	-275	-97	-23	-920	-1400
d_{31} [pC/N]	149	289	374	593	225	33	2200	2400
d_{15} [pC/N]		496	584	741	330			
g_{33} [$10^{-3} \cdot \text{Vm/N}$]	5,0	-11,1	-11,4	-9,1	-11,0	216,0	-17,1	24,3
g_{31} [$10^{-3} \cdot \text{Vm/N}$]	14,1	26,1	24,8	19,7	25,4	330,0	44,0	41,7
g_{15} [$10^{-3} \cdot \text{Vm/N}$]		39,4	38,2	26,8	28,9			
k_{33} [–]	0,48	0,70	0,71	0,75	0,64	0,15	0,93	0,90
Q_m [–]	300	500	75	65	1000	3-10	69	
T_c [°C]	115	328	365	193	300	100	145	100

3.4 Modelování piezoelektrického efektu v programu ANSYS

V konečno-prvkovém programu ANSYS nalezneme piezoelektrickou analýzu pod řešením úloh sdružených polí. Pomocí následujících elementů lze modelovat piezoelektrické úlohy, tyto elementy lze použít při statické, modální, harmonické i transientní analýze [23]:

- PLANE13 a PLANE223 – 2D prvek se čtyřmi a osmi uzly (čtyřúhelník)
- SOLID5 a SOLID226 - 3D prvek s osmi a dvaceti uzly (krychle)
- SOLID98 a SOLID227 – 3D prvek s deseti uzly (čtyřstěn)

3D piezoelektrické prvky mají 4 stupně volnosti. Tři jsou klasické posuvy a čtvrtý stupeň volnosti je napětí. Proto se při zadávání okrajových podmínek nesmí zapomenout nastavit všechny 4 stupně volnosti včetně napětí. Tato podmínka se nejčastěji nastavuje tak, že nějakou část modelu uzemníme (bude tam nulové napětí).

Piezoelektrický efekt je modelován podle lineárních vztahů, které již byly zmíněny v předchozí kapitole. V manuálu programu ANSYS jsou zde tyto rovnice uvedeny v jedné rovnici pomocí maticového tvaru [24]:

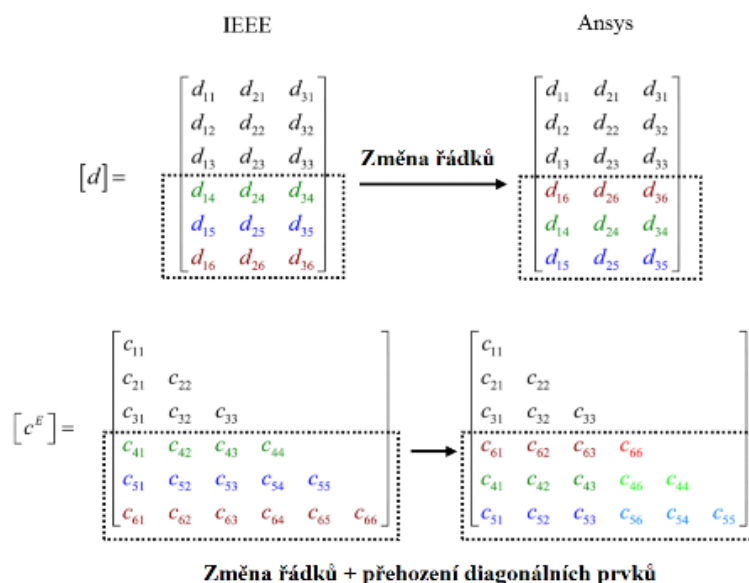
$$\begin{Bmatrix} \{T\} \\ \{D\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [c^E] & [e] \\ [e]^T & -[\epsilon^S] \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \{S\} \\ -\{E\} \end{Bmatrix} \quad (3.11)$$

kde $\{T\}$ je vektor mechanických napětí, $\{D\}$ je vektor elektrické indukce, $\{S\}$ je vektor mechanického přetvoření, $\{E\}$ je vektor intenzity elektrického pole, $[c^E]$ je matice tuhosti při konstantní intenzitě elektrického pole E , $[e]$ je matice napěťových konstant, $[\epsilon^S]$ je matice permitivity při konstantním přetvoření S .

Při piezoelektrické analýze tedy musíme nastavit tyto tři následující charakteristiky:

- Matici elastických vlastností – můžeme ji nastavit ve formě matice tuhosti $[c^E]$ nebo ve formě matice poddajnosti $[s^E]$. Vzájemný přepočtový vztah je následující: $[s^E] = [c^E]^{-1}$.
- Matici piezoelektrických vlastností – můžeme ji nastavit v napěťové formě $[e]$ nebo ve formě přetvoření $[d]$. Vzájemný přepočtový vztah je následující: $[e] = [c^E][d]$.
- Matici permitivity - můžeme ji nastavit v napěťové formě $[\epsilon^S]$ nebo ve formě přetvoření $[\epsilon^T]$. Vzájemný přepočtový vztah je následující: $[\epsilon^S] = [\epsilon^T] - [e]^T[d]$.

Při zadávání těchto charakteristik v programu ANSYS si musíme dávat pozor, protože je zde malá odlišnost vůči normě ANSI/IEEE Std 176-1987. Tato odchylka se nachází u matice elastických vlastností $[c^E]$ a také u matice piezoelektrických vlastností $[d]$. Jak je to znázorněno na Obr. 10, dochází k přehození posledního řádku na čtvrtý řádek a to způsobí posun řádků 4 a 5 o jeden dolů. Navíc ještě u matice elastických vlastností dojde k přehození jednotlivých prvků tak, aby diagonální prvky zůstaly na diagonále, což má za následek ovlivnění pouze smykových složek obou matic.



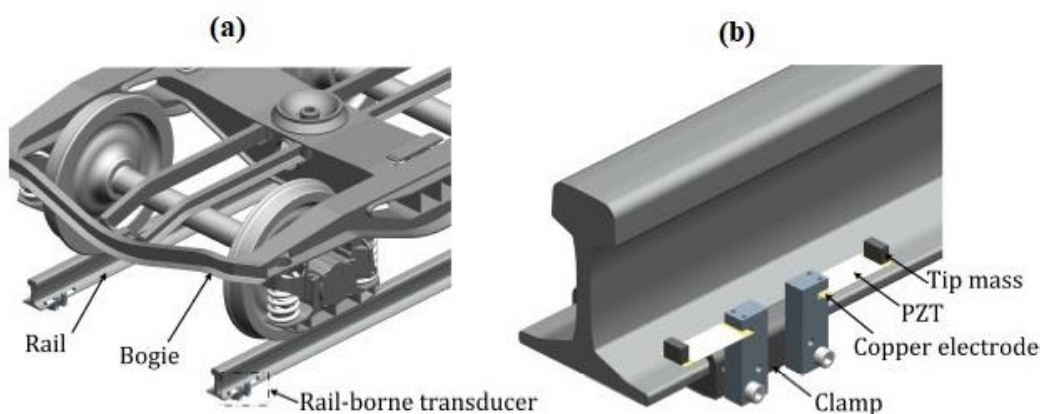
Obr. 10 Změna zadávání piezoelektrické a elastické matice z IEEE standardu do formátu ANSYS [9]

4 Současný stav v oblasti snímání a zisku energie na železniční trati pomocí piezoelektrické přeměny

V následující kapitole budou popsány některé konstrukční řešení piezoelektrických generátorů, které se podle konstrukce umísí na železniční trať a je možné pomocí nich získávat energii nebo je využít ke snímání.

4.1 Rail-borne piezoelektrický generátor

Autoři Gao a kol. ve svém článku [25] navrhli konstrukci nosníkového piezoelektrického generátoru, který slouží pro výrobu elektrické energie při průjezdu vlaku. Jejich generátor využívá k přeměně energie malých vibrací kolejnice vlivem zatížení od nápravy projíždějícího vlaku. Konstrukce jejich generátoru je velmi jednoduchá. Jedná se o vetknutý nosník s unimorfní strukturou (Obr. 11), tedy na měděném substrátu je připevněna vrstva PZT a na konci nosníku je přidána hmota. Celý tento nosník je připevněn pomocí speciální svorky k patě kolejnice přesně doprostřed mezi dva pražce, tak aby docházelo k největší deformaci.



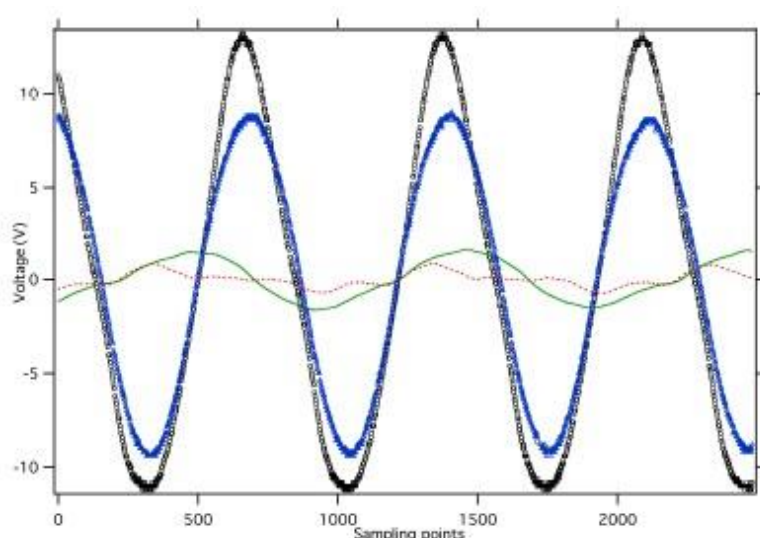
Obr. 11 (a) Poloha a velikost generátoru vzhledem k nápravě (b) Detailní pohled na připevněný generátor [25]

Zařízení bylo testováno v laboratoři na reálné kolejnici, která byla podložena dvěma bloky v místech, kde by se jinak nacházely betonové pražce. Mezi bloky byla vložena podložka, která kontrolovala průhyb kolejnice podle velikosti namáhání od 20 kN do 140 kN. Zatěžování bylo realizováno zátěžným ramenem, které bylo poháněno hydraulickým systémem, a bylo tak umožněno nastavení jakéhokoli průběhu zátěžné síly.

Při experimentech se autoři zaměřili na nízko-frekvenční buzení kolejnice o velikosti od 3 Hz do 7 Hz. Velikost buzení si spočítali při pohybujícím se zatížení z vibrační odezvy kolejnice a zjistili, že je závislé na rychlosti vlaku. Rychlost 80 km/h odpovídá buzení 3-5 Hz a oni předpokládali rychlost 250 km/h, která odpovídá buzení 5-7 Hz. Zrychlení kolejnice bylo 5 g a tomu odpovídající velikost průhybu byla 0,2 mm při 7 Hz a 0,4 mm při 5 Hz.

Cílem bylo zjistit, jak velikých napětí a výkonů lze při jednotlivých konfiguracích dosáhnout. Když se podíváme na Obr. 12, kde je vykresleno napětí otevřeného obvodu v závislosti

na vzorkovacím bodě, tak je patrné, že velký vliv bude mít přidaná hmota na konci nosníku. Vzorkovací frekvence byla 0,0002 s. Vidíme tedy, že největšího napětí dosáhl generátor při frekvenci buzení 7 Hz, maximální napětí bylo $U_{p-p} = 24,4 \text{ V}$ a jeho střední hodnota $U_{RMS} = 8,2 \text{ V}$.



Červená

buzení 5 Hz, přidaná hmota 0g,
 $U_{p-p} = 1,58 \text{ V}$, $U_{RMS} = 0,39 \text{ V}$.

Zelená

buzení 5 Hz, přidaná hmota 30g,
 $U_{p-p} = 3,24 \text{ V}$, $U_{RMS} = 1,0 \text{ V}$.

Modrá

buzení 7 Hz, přidaná hmota 30g,
 $U_{p-p} = 18,4 \text{ V}$, $U_{RMS} = 6,4 \text{ V}$.

Černá

buzení 7 Hz, přidaná hmota 60g,
 $U_{p-p} = 24,4 \text{ V}$, $U_{RMS} = 8,2 \text{ V}$.

Obr. 12 Napětí piezoelektrického generátoru v závislosti na dané konfiguraci [25]

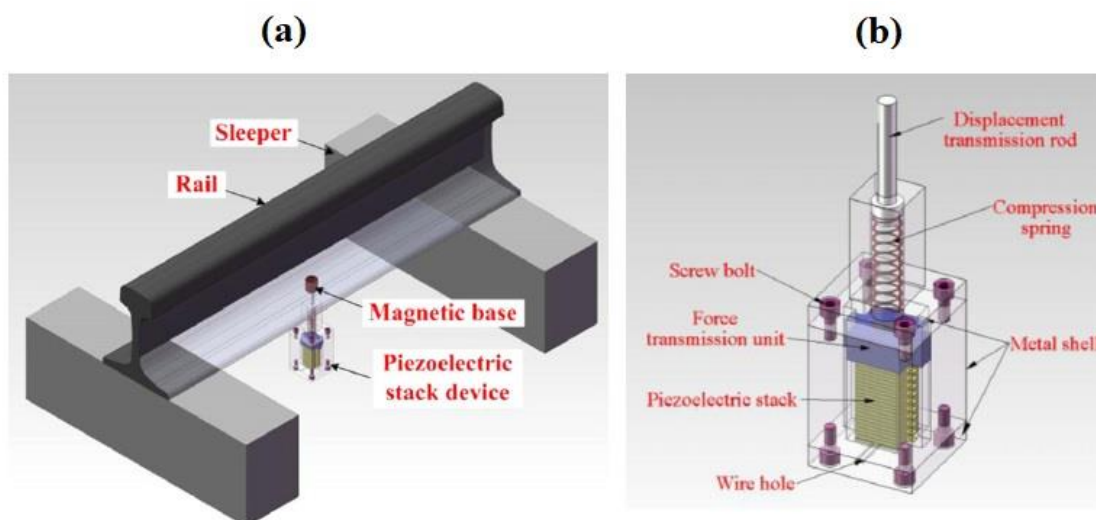
Poté bylo ještě potřeba nutné naladit impedanci zátěže tak, aby byl získaný výkon co největší. V případě kdyby byla impedance nízká, dojde k velkým poklesům výstupního napětí. Aby bylo dosaženo optimální hranice výstupního výkonu je potřeba sladit impedanci zátěže s vnitřní impedancí PZT vrstvy. Při těchto testovacích podmínkách dosahoval výstupní výkon $P_{p-p} = 4,88 \text{ mW}$ s napětím $U_{p-p} = 22,1 \text{ V}$ při impedanci zátěže 100 kΩ.

4.2 Stack-type piezoelektrický generátor

V práci autorů Wang a kol. [26] je představen stack-type piezoelektrický generátor a následně se zabývají jeho konstrukcí a provádí na něm experimentální měření. Stejně jako v předchozí kapitole tento generátor využívá k přeměně energie vibrací kolejnice při přejezdu vlaku. Lze jej také umístit i pod pražcem, jeho primární použití je však pod kolejnici přímo uprostřed mezi dvěma pražci, viz Obr. 13a.

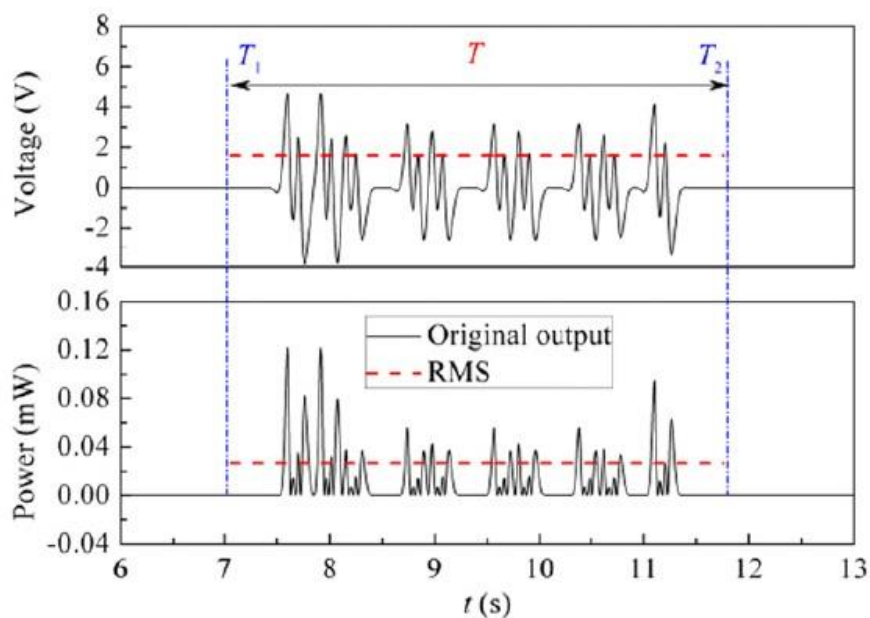
Konstrukce tohoto generátoru je zobrazena a popsána na Obr. 13b. Skládá se z několika základních prvků – tím prvním je kovová obálka, ve které je schovaných 20 piezoelektrických vrstev PZT-5H prokládaných mosaznými elektrodami a na konci uložených do ochranných keramických vrstev. Dalším prvkem je pomocná tyč, která převádí zatížení od kolejnice směrem k piezoelektrickým vrstvám. Důležitou součástí konstrukce je stlačující pružina, jež také ovlivňuje celkový výstupní výkon. Čím je tuhost této pružiny vyšší, tím je také vyšší výstupní výkon. Je nutné ale, aby tuhost pružiny byla zanedbatelná vůči tuhosti kolejnice, aby to neovlivnilo bezpečnost provozu.

Zařízení bylo testováno v laboratoři, kde byly vytvořeny podobné podmínky, které jsou na reálné kolejnici při průjezdu vlaku. Toto bylo realizováno pomocí nízko-frekvenčního únavového testovacího stroje a ovládací skřínky, kde byl nastavován odpor zátěže.



Obr. 13 (a) Umístění generátoru pod kolejnicí (b) Detailní pohled na generátor [26]

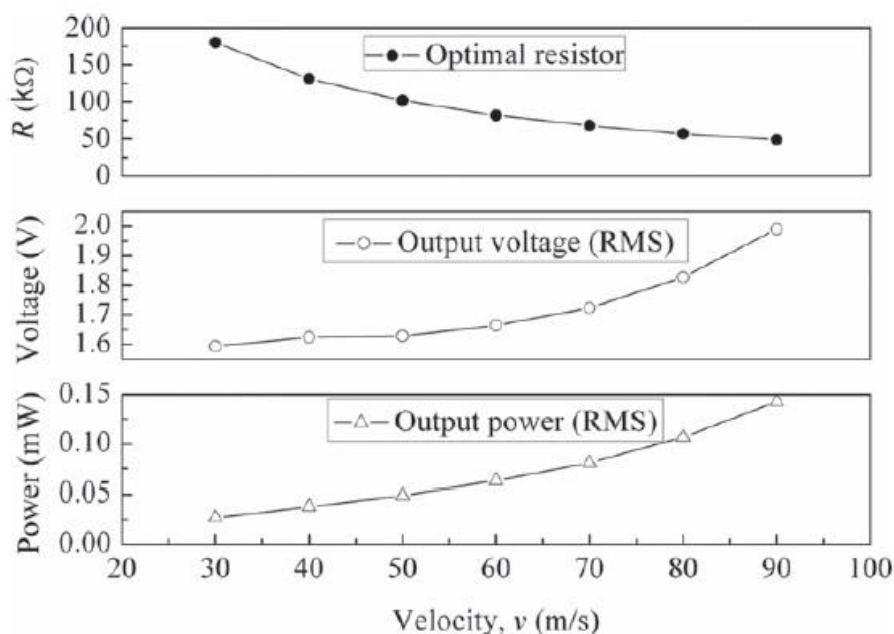
Nejprve bylo potřeba stanovit, jaký je optimální odpor zátěže pro danou rychlost – toho bylo dosaženo pomocí průběhu celkové energie. Z grafu bylo patrné, že čím je vyšší rychlost, tím se zvyšuje celková energie a je potřeba nastavit menší odpor zátěže. Následně byl proveden experiment pro vybranou rychlost 30 m/s, jehož optimálním odpor zátěže je 180 k Ω . Výsledky tohoto experimentu můžeme vidět na Obr. 14. Střední hodnoty napětí dosahují $U_{RMS} = 1,59$ V a střední hodnoty výkonu dosahují $P_{RMS} = 0,027$ mW.



Obr. 14 Časový průběh napětí a výkonu [26]

Následně se ještě autoři zaměřili na to, jaké střední hodnoty výstupního napětí a výkonu jsou schopni získat při různých rychlostech. Jelikož změna rychlosti ovlivňuje optimální odpor zátěže, tak je potřeba tento odpor také přenastavit, aby výstupní výkon a napětí byly co největší.

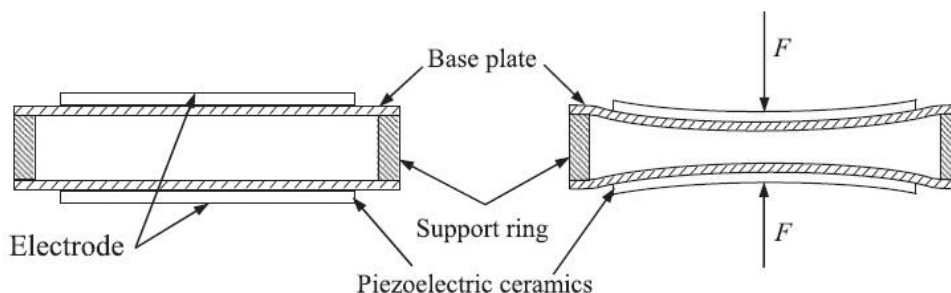
Vliv rychlosti můžeme vidět v grafech na Obr. 15. Z grafů je tedy patrné, že při vyšších rychlostech jsme schopni získat větší napětí a výkon, ale je k tomu potřeba mít nastavený optimální odpor zátěže, který se se zvyšující se rychlostí snižuje.



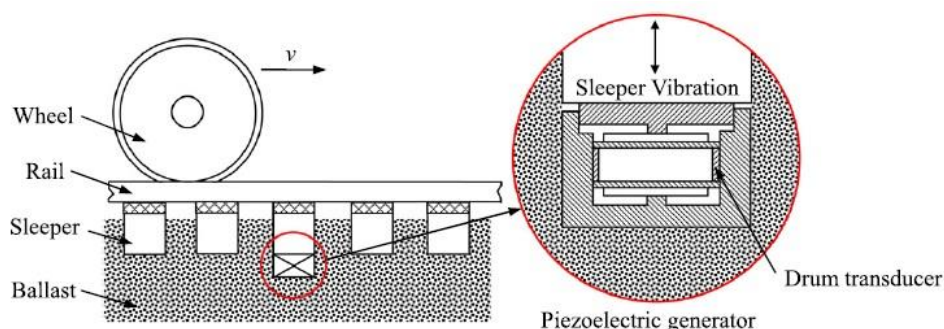
Obr. 15 Vliv rychlosti na výstupní napětí a výkon [26]

4.3 Drum piezoelektrický generátor

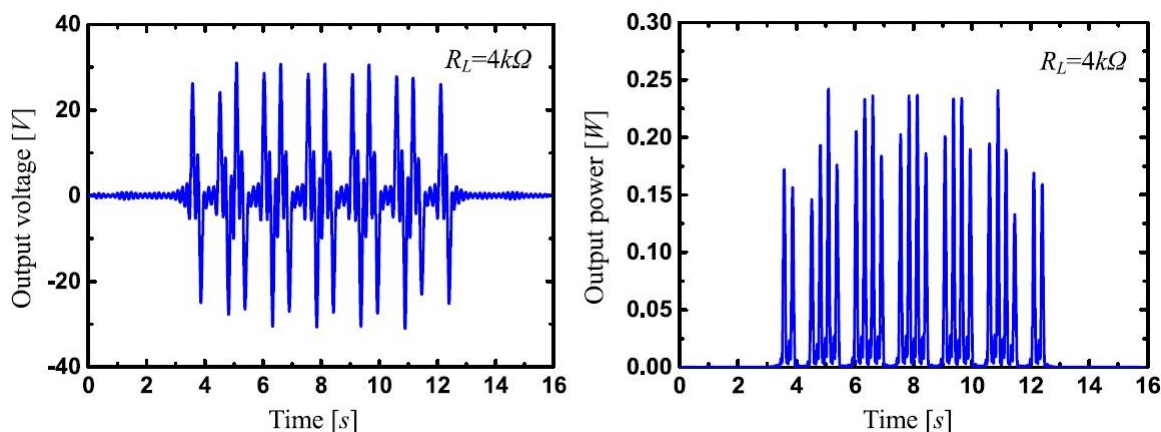
Autoři Tianchen a kol. se ve své práci [27] zabývali získkem elektrické energie na železnici a vytvořili drum piezoelektrický generátor, který slouží k napájení bezdrátových senzorů monitorujících stav železnice. Konstrukce tohoto generátoru je poměrně jednoduchá a lze se na ni podívat na Obr. 16. Generátor je složen ze dvou mosazných základních desek, na kterých je připevněna piezoelektrická keramika PZT-4 pokrytá elektrodami. Desky jsou propojeny podpůrným kroužkem tak, aby se mohly deformovat. Na Obr. 17 můžeme vidět umístění drum piezoelektrického generátoru, který se vkládá pod pražec. Pro získ většího množství energie lze vložit pod pražec více těchto generátorů. Krycí rám, do kterého je generátor vložen, je navržen tak, aby byla síla vzniklá průhybem pražce koncentrována ve středu kvůli dosažení maximální deformace piezokeramiky.



Obr. 16 Konstrukce drum piezoelektrického generátoru [27]


Obr. 17 Umístění generátoru pod pražcem [27]

Nejprve si autoři sestavili analytický model, který počítal se 120 m dlouhou kolejnicí a 200 pražci a svůj piezoelektrický generátor umístili přesně doprostřed. Jako zátěž použili jedoucí vlak rychlostí 60 km/h, jehož parametry byly převzaty ze soupravy metra, která jezdí v Shanghai. Pro výpočet použili program Matlab. Výstupní hodnoty napětí a výkonu, při použitím odporu zátěže 4 k Ω můžeme vidět na Obr. 18.


Obr. 18 Výsledky analytického výpočtu výstupního napětí a výkonu [27]

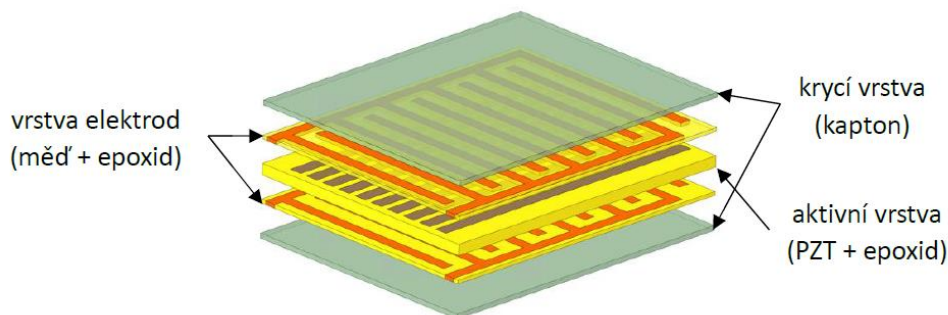
Následně byl generátor testován v laboratoři na reálné kolejnici, která byla připevněna na více místech k blokům, které představovaly pražce. Tyto bloky byly ještě na větších blocích, které nahrazovaly podval. Zatížení kolejnice bylo prováděno reálným kolem, které jelo po kolejnici a bylo přitlačováno silou. Autoři provedli více experimentů, kde postupně měnili zatížení a nastavovali různé odpory zátěže. Jako optimální hodnota odporu, při které bylo dosaženo maximálního výkonu, byla stanovena 4 M Ω . V Tab. 3 nalezneme porovnání výsledků simulace s experimentem.

Tab. 3 Porovnání simulačních a experimentálních výsledků [27]

	Malé zatížení			Plné zatížení			Přetížení		
	Simul.	Exper.	Chyba	Simul.	Exper.	Chyba	Simul.	Exper.	Chyba
U_{RMS} [V]	13,54	12,84	5,45 %	16,84	15,55	8,29 %	18,30	17,29	5,84 %
P_{RMS} [mW]	0,056	0,055	1,82 %	0,085	0,081	4,98 %	0,100	0,102	1,96 %
E [mJ]	1,39	1,33	4,51 %	2,16	2,08	5,19 %	2,43	2,31	7,18 %

5 Homogenizace MFC kompozitu

Modelovat MFC ve výpočetním programu by bylo velmi pracné a hlavně by vedlo na obrovskou složitost modelu, jelikož MFC kompozit se skládá z více materiálů, jehož některé prvky jsou často velmi malé a také zapracované do sebe. Strukturu MFC lze spatřit na Obr. 19, tento obrázek vychází z parametrů popsaných v katalogovém listě firmy Smart Material [28]. PZT vlákna jsou zalita v epoxidové pryskyřici, z obou stran se nachází vrstva měděných elektrod, které jsou do sebe zapracovány hřebenovým principem a nakonec je tato struktura překryta ochrannou vrstvou kaptonu.



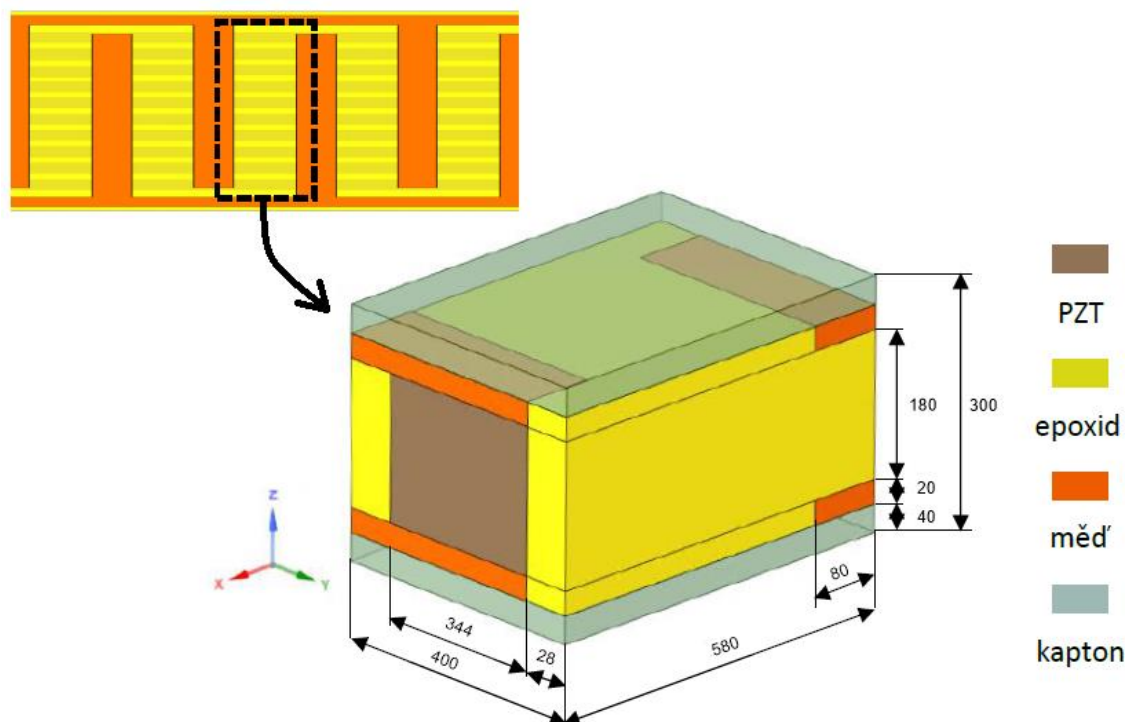
Obr. 19 Vnitřní struktura MFC kompozitu [29]

Kvůli zjednodušení modelu se jeví jako přínosné modelovat MFC kompozit jako homogenní materiál s příslušnými mechanickými a elektromechanickými vlastnostmi. Jakmile bude vytvořen homogenní model, lze pak s ním modelovat i různě veliké MFC stejného typu, což je další nespornou výhodou.

Touto homogenizací se ve své diplomové práci zabýval Běhal [29], z něhož pak za spolupráce dalších kolegů vznikl článek v knize [30]. V této diplomové práci bude využíván právě jeho homogenizovaný model, proto v této kapitole bude ve zkratce nastíněno, jak Běhal došel k příslušným mechanickým a elektromechanickým vlastnostem. Jelikož výrobce neuvádí ve svém katalogovém listě [28] dostatečné informace, bylo potřeba si všechny potřebné vlastnosti spočítat samostatně a následně ověřit jejich hodnoty pomocí experimentu. Jak autor uvádí, jsou možné tři různé přístupy, jak získat dané parametry. Prvním z nich je použití směšovacího pravidla, dále je to využití asymptotické metody homogenizace a třetím přístupem je MKP model elementární buňky, který autor nakonec zvolil [29].

5.1 Model elementární buňky MFC

V této podkapitole se autor zabývá tvorbou homogenního modelu MFC pomocí modelování elementární buňky metodou MKP. Elementární buňka je takový objem, který reprezentuje podstatné části struktury, jehož opakováním vznikne celek. Z jaké části MFC byl vytvořen lze vidět na Obr. 20. Na stejném obrázku můžeme vidět, jak vypadá struktura elementární buňky. Můžeme si povšimnout, že elementární buňka obsahuje pouze jedno PZT vlákno, což je z důvodu zjednodušení modelu. Rozměry, objemové podíly a materiálové charakteristiky jednotlivých složek struktury jsou známy. Měď, epoxid a kapton byly uvažovány lineárně izotropní, kdežto PZT popisujeme pomocí anizotropního chování. [29]



Obr. 20 Elementární buňka MFC (rozměry v μm) [29]

Autor provedl 7 výpočtů, které odpovídaly 7 různým zatěžovacím stavům. Následně z nich spočítal ekvivalentní vlastnosti homogenizovaného MFC. Pro každý zátěžný stav nastavil jiné okrajové podmínky, které jsou uvedeny v práci [29]. V prvních 6 výpočtech nastavil nulové napětí na elektrodách, došlo ke zjednodušení rovnic. Vlastnosti materiálu zhodnotil pomocí základních konstitutivních rovnic pro piezoelektrické materiály a pomocí průměrných hodnot mechanického napětí, mechanického přetvoření, elektrické indukce a intenzity elektrického pole v elementární buňce. V posledním výpočtu pak nastavil na jednu z elektrod nenulové napětí tak, aby bylo možno stanovit i hodnotu relativní permitivity. Při výpočtu ale muselo být vzato v potaz, že elektrická kapacita elementární buňky i homogenizovaného MFC musí zůstat stejná.

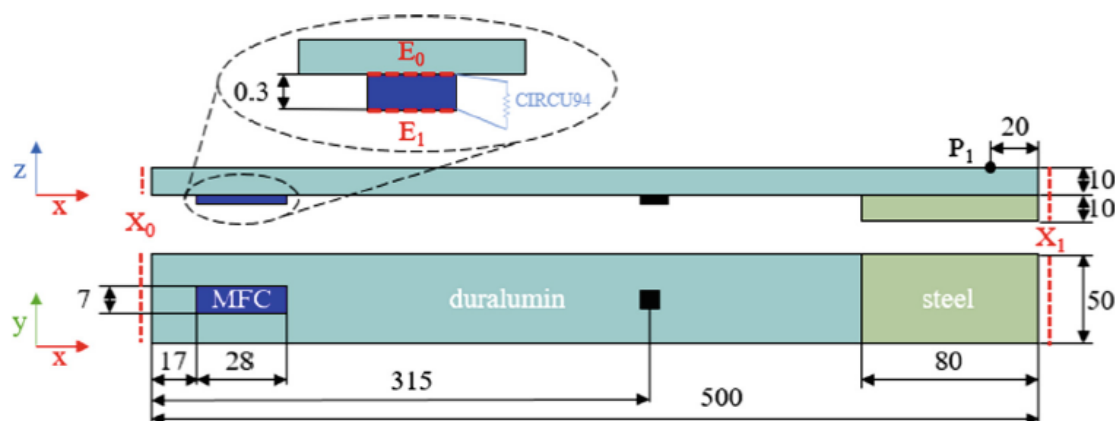
Materiálové vlastnosti homogenizovaného MFC pomocí MKP modelování jsou zobrazeny v Tab. 4. Autor zmiňuje, že výsledné materiálové vlastnosti mají dobrou shodu se získanými hodnotami při použití jiných metod [29]. Po nahlédnutí do katalogu [28] lze konstatovat, že i s těmito hodnotami vykazují autorem spočítané hodnoty dobrou shodu.

Tab. 4 Materiálové vlastnosti homogenizovaného MFC [29]

Modul pružnosti v tahu [GPa]		Poissonovo číslo [–]		Modul pružnosti ve smyku [GPa]		Piezoel. nábojová konstanta [pC/N]		Relativní permitivita [–]	
E_1	31,6	μ_{12}	0,4	G_{12}	4,9	d_{31}	-173	ε_{r33}^T	2253
E_2	17,1	μ_{23}	0,2	G_{23}	2,5	d_{32}	-150		
E_3	9,5	μ_{13}	0,4	G_{13}	2,4	d_{33}	325		

5.2 Ověření homogenizovaných materiálových vlastností

Vypočítaná materiálové vlastnosti homogenizovaného MFC bylo potřeba ověřit, což bylo provedeno porovnáním MKP modelu s experimentem. V programu ANSYS autor provedl harmonickou analýzu nosníku, jehož geometrii můžeme vidět na Obr. 21. V tomto výpočtu použil homogenizovaný model MFC (Tab. 4), jehož hustota byla 5540 kg/m^3 . Okrajové podmínky nastavil tak, aby to odpovídaly prováděnému experimentu, tudíž plocha X_0 byla vetknutá, na plochu X_1 byla nastavena síla, jejíž velikost musela být taková, aby průhyb nosníku v bodě P_1 odpovídal průhybu při experimentu. Plochy E_0 a E_1 představují elektrody a element CIRCU94 mezi nimi představuje odpor zátěže, který se během jednotlivých výpočtů měnil. Na plochu E_0 byl nastaven nulový potenciál.

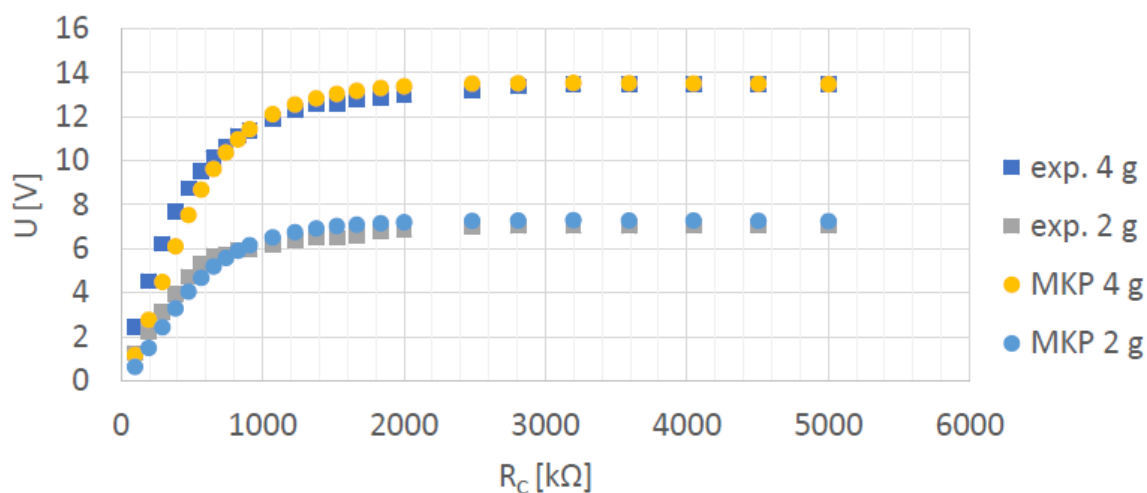


Obr. 21 Geometrie nosníku použitá pro MKP model (rozměry v mm) [30]

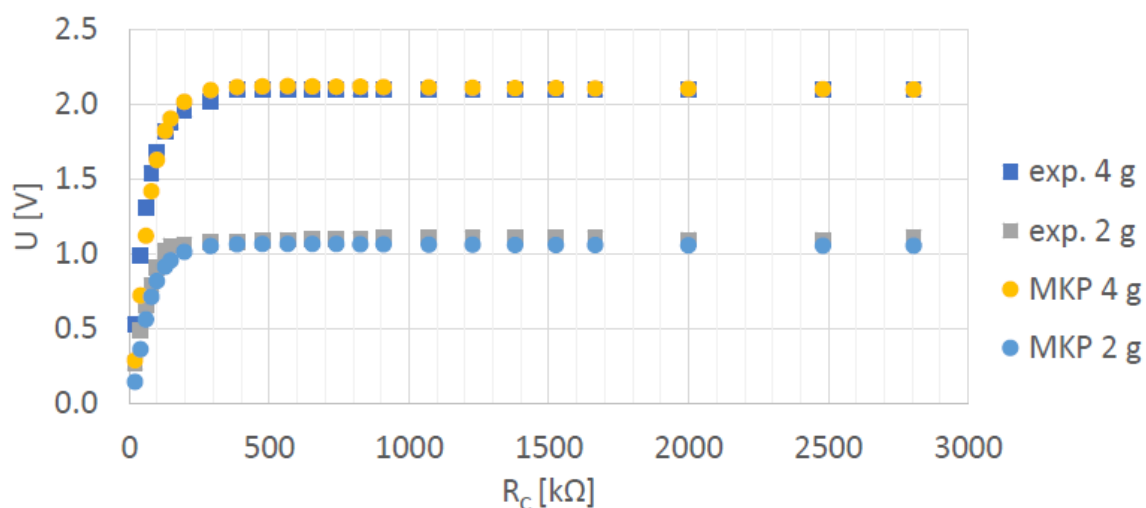
Experimentální zařízení vypadalo úplně stejně jako MKP model na Obr. 21. Hlavním prvkem byl duralový nosník, na jehož konci byl připevněn ocelový plátek. Na druhé straně byl nosník vložen do pevné základny a kousek od základny byl na spodní část přilepen MFC snímač typu M2807-P2 od Smart Material [28] s rozměry aktivní vrstvy $28 \text{ mm} \times 7 \text{ mm} \times 0,3 \text{ mm}$.

Celkem autor provedl tři série měření, kdy při každé sérii byl nosník buzen na jinou vlastní frekvenci. První dvě měření odpovídaly prvnímu, resp. druhému ohybovému módu, jehož hodnoty byly $19,8 \text{ Hz}$, resp. $165,4 \text{ Hz}$. Při třetí sérii měření bylo zhruba doprostřed nosníku přidáno závaží o hmotnosti 456 g . Při tomto měření byl nosník vybuzen na druhou vlastní frekvenci o hodnotě $120,5 \text{ Hz}$. Pro každou sérii měření autor zvolil dvě různé hodnoty zátěžné síly tak, aby představovaly zrychlení volného konce nosníku 4 g a 2 g . Ještě byla postupně zvyšována hodnota elektrického odporu zátěže R_C z $10 \text{ k}\Omega$ na $10 \text{ M}\Omega$.

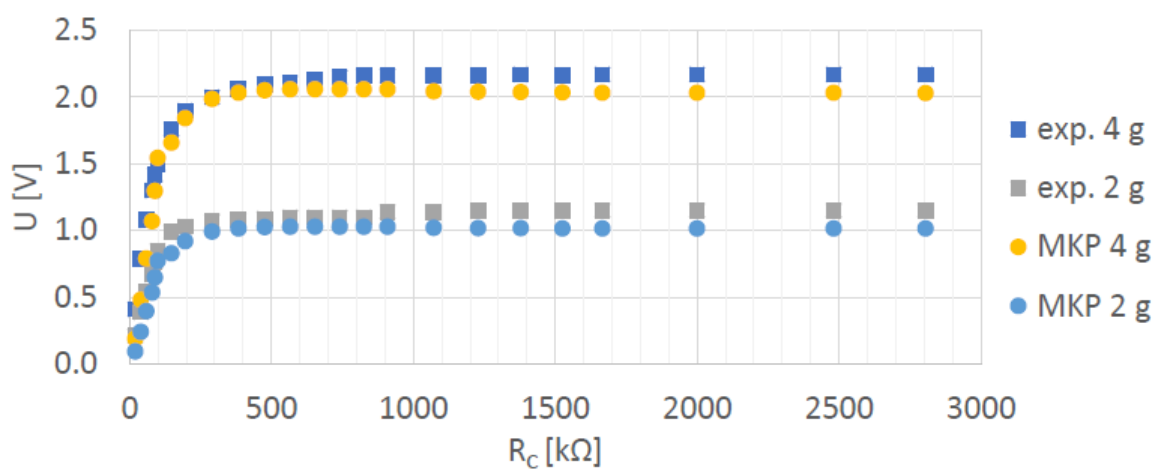
Závěrem autor porovnává výsledky z experimentálního měření a výpočtového modelu. První, resp. druhá série výsledků je zobrazena na Obr. 22, resp. Obr. 23 a představuje kmitání nosníku bez přídavné hmotnosti na frekvenci $19,8 \text{ Hz}$, resp. $165,4 \text{ Hz}$. Třetí sérii výsledků můžeme vidět na Obr. 24 a odpovídá kmitání nosníku s přidaným závažím na frekvenci $120,5 \text{ Hz}$. Ve všech případech, jak můžeme vidět z jednotlivých grafů, byl dosažen téměř shodný průběh napětí v závislosti na odporu zátěže. Významné rozdíly jsou pozorovány pouze v přechodové oblasti, ale ty nejsou větší než 5% . Materiálové charakteristiky lze tedy použít pro modelování homogenního MFC.



Obr. 22 Porovnání napětí v závislosti na odporu pro $f = 19,8$ Hz [29]



Obr. 23 Porovnání napětí v závislosti na odporu pro $f = 165,4$ Hz [29]



Obr. 24 Porovnání napětí v závislosti na odporu pro $f = 120,5$ Hz [29]

6 Analýza vhodného umístění, natočení vláken a velikosti MFC

V této kapitole se zaměříme na výběr vhodné konfigurace MFC snímače, abychom získali co největší možné napětí při průhybu kolejnice způsobené přejezdem vlaku. Nejprve bude potřeba popsat použité prvky numerického modelu a poté vysvětlit dynamiku kolejového svršku. Abychom dosáhli správných výsledků, je potřeba vhodně nastavit okrajové podmínky, poté lze už provést harmonická analýza, pomocí které budeme vhodnou konfiguraci zjišťovat.

6.1 Numerický model

Základem funkčního numerického modelu je správně vybrat elementy, které budou potřeba pro výpočet, dále vybrat vhodnou část geometrie a vytvořit správnou konečnoprvkovou síť tak, aby výpočty nebyly časově a výpočtetně náročné a v neposlední řadě je také nutné vhodně nastavit okrajové podmínky. Toto vše bude popsáno v následující kapitole.

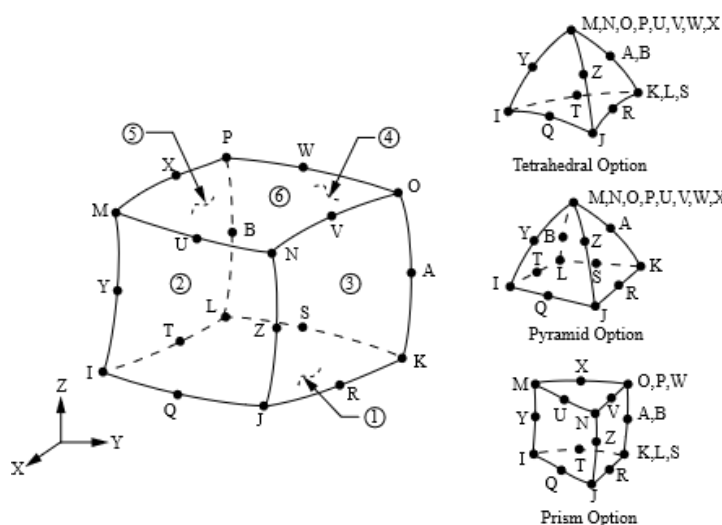
6.1.1 Popis použitých konečno-prvkových elementů

V této kapitole budou popsány jednotlivé konečno-prvkové elementy z programu ANSYS, které budou během výpočtů v této práci použity.

- **SOLID226**

Jedná se o 3D element, který má 20 uzlů s až 6 stupňů volnosti na uzel. Pomocí tohoto elementu lze modelovat složitější multifyzikální úlohy, např. strukturálně tepelné, piezoelektrické, tepelně elektrické, strukturálně magnetické a mnoho dalších kombinací. Toho lze dosáhnout výběrem typu v nastavení elementu. Podle typu vybrané úlohy také bude mít každý uzel určité typ a počet stupňů volnosti. [31]

V této práci je použit element pro modelování piezoelektrické přeměny. Pro tuto úlohu má každý uzel 4 stupně volnosti - posunutí v ose x , y , z a k tomu ještě napětí. Do každého uzlu pak lze aplikovat sílu v jednotlivých směrech a ještě navíc i náboj. Pomocí elementu SOLID226 je modelován jak piezoelektrický snímač, tak i kolejnice. Poté je ale potřeba nezapomenout, že modelu kolejnice je potřeba zadat i piezoelektrické vlastnosti (nejen ty elastické).

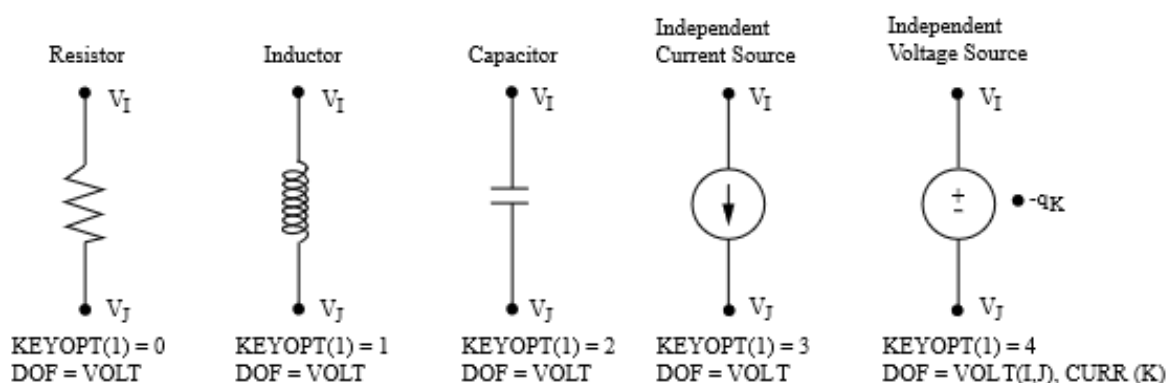


Obr. 25 Element SOLID226 [31]

• CIRC94

Jedná se o element, který je součástí elektrického obvodu při piezoelektrické analýze. Tento element modeluje chování základních komponentů lineárních elektrických obvodů, mezi něž patří rezistor, kondenzátor, cívka a proudový nebo napěťový zdroj. Element má vždy dva uzly, kterým přísluší pouze jeden stupeň volnosti, a to napětí. Pro napěťový zdroj je tu navíc ještě jeden uzel, který má také jeden stupeň volnosti, a to proud. CIRC94 může být propojen s některými piezoelektrickými prvky, např. PLANE223, SOLID226 nebo SOLID 227. Tento prvek je použitelný při analýzách *full harmonic* a *transient*. [31]

V této práci je použit element typu rezistor pro modelování uzavřeného obvodu piezoelektrického snímače. Na tomto elementu, který je připojen mezi dvěma elektrodami, tedy vznikne rozdíl napětí, který se rovná vzniklému napětí na piezoelektrickém snímači vlivem deformace kolejnice.

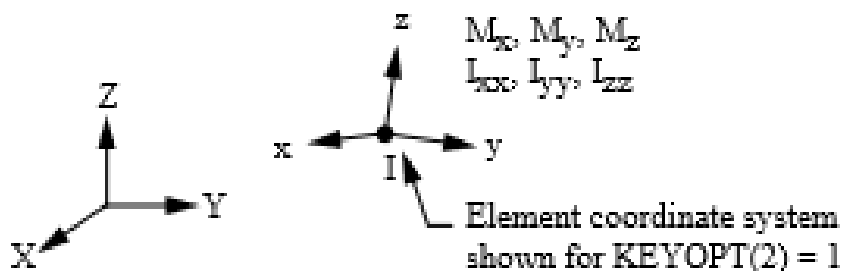


Obr. 26 Element CIRC94 [31]

• MASS21

Jedná se o 3D bodový element, který má obecně až 6 stupňů volnosti – posunutí v osách x , y , z a rotaci kolem os x , y , z . Je možné nastavit různé hodnoty hmotnosti a momentů setrvačnosti v každém směru. Nejčastěji se ale tento element v modelech používá pro zastoupení hmotnosti, kdy tolik nezáleží na tvaru, ale zejména na hmotnosti. [31]

V této práci je použit tento element pro modelování pražce, který slouží k modelování dynamických vlastností kolejového svršku. Jelikož zde není podstatné modelovat celý pražec, na rozdíl od kolejnice, tak nám stačí zadat pouze jeho hmotnost pomocí tohoto elementu.

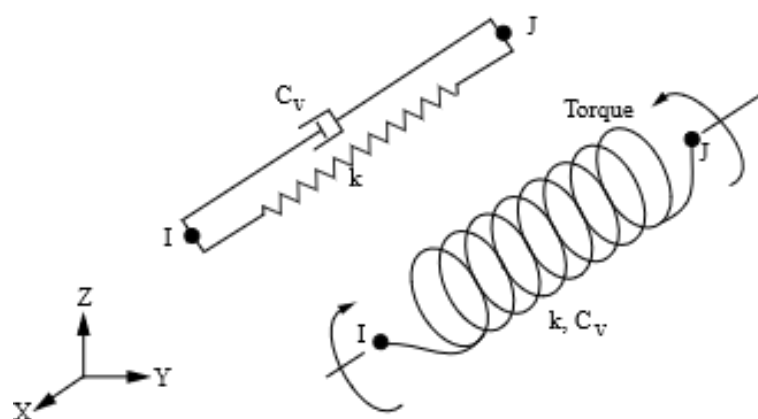


Obr. 27 Element MASS21 [31]

• COMBIN14

Jedná se o element, který v modelu představuje podélný nebo torzní pružinu a tlumič. V případě podélné varianty lze přenášet pouze jednoosý tah nebo tlak se 3 stupni volnosti v každém uzlu – posunutí v ose x , y , z . Ohyb ani krut není brán v úvahu. V případě torzní varianty se element považuje čistě za rotační se 3 stupni volnosti v každém uzlu – rotace kolem os x , y , z . Ohybové ani axiální namáhání není bráno v úvahu. Ani jedna varianta nepočítá s hmotností elementu. [31]

V této práci je použit podélný element pružina a tlumič dohromady, který slouží k modelování dynamických vlastností kolejového svršku. Dynamika kolejového svršku i s hodnotami jednotlivých tuhostí a tlumení je popsána v následující kapitole.



Obr. 28 Element COMBIN14 [31]

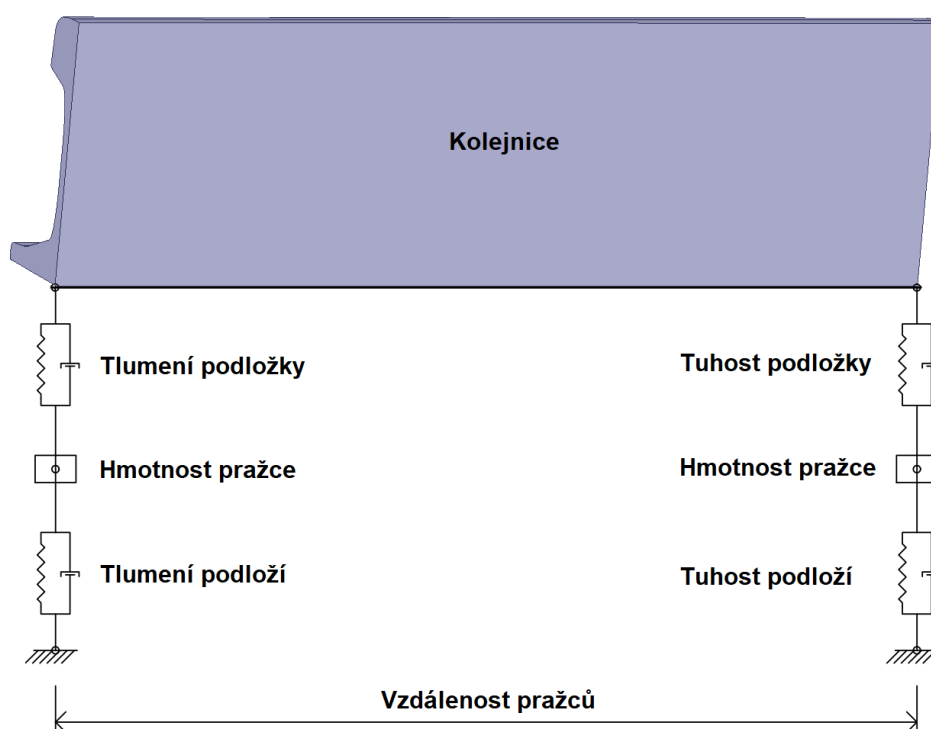
6.1.2 Dynamické vlastnosti kolejového svršku

Důležitým prvkem, na kterém jsou železniční tratě založeny, je dynamika železniční tratě. Díky této dynamice mohou jezdit vlaky vyšší rychlostí a jejich hlučnost se velmi snižuje. Železniční trať se ze stavebního hlediska rozděluje na železniční spodek a železniční svršek. Jelikož problematika modelování železničního spodku je relativně složitá, nebudeme se jí v této práci zabývat a zaměříme se pouze na železniční svršek. Součástí železničního svršku jsou kolejnice, upevňovací prahce, kolejové lože (podložky) a často ještě také tlumící podložky, které se vkládají mezi kolejnici a prahce. [32]

Díky dynamickým vlastnostem tedy dochází k většímu průhybu kolejnice při průjezdu vlakové soupravy, což je nutné zahrnout to do numerického modelu, protože to bude mít velký vliv na připojený MFC snímač. Při tvorbě modelu jsou upevňovací nepodstatná, tudíž nebudou do modelu zahrnuty. Na Obr. 29 můžeme vidět zjednodušený dynamický model kolejového svršku, který bude implementován pomocí jednotlivých elementů do numerického modelu. Použité elementy a velikosti jednotlivých veličin se nacházejí v Tab. 5. Kolejnice je v místech, kde se nacházejí prahce, spojena přes tlumící podložku (element COMBIN14) s prahcem (element MASS21). Jelikož modelujeme pouze jednu kolej, je zde použita pouze poloviční hmotnost prahce. Následně je ještě prahce spojen přes kolejové lože (element COMBIN14) s pevnou zemí. Vzdálenost dvou prahců od sebe závisí od typu a délky použité kolejnice. Pro zvolený profil UIC 60 je předepsána osová vzdálenost prahců 600 mm [32].

Tab. 5 Parametry kolejového svršku [33]

	Použitý element	Veličina	Hodnota	Jednotka
Kolejnice se snímačem	SOLID226			
Podložka	COMBIN14	Tuhost - k_p	$2,5 \times 10^8$	N/m
		Tlumení - c_p	$9,0 \times 10^5$	N · s/m
Pražec	MASS21	Hmotnost - m_s	150	kg
		Vzdálenost - l_s	0,6	m
Podloží	COMBIN14	Tuhost - k_b	$4,0 \times 10^7$	N/m
		Tlumení - c_b	$1,2 \times 10^6$	N · s/m



Obr. 29 Dynamický model kolejového svršku

6.1.3 Model materiálu

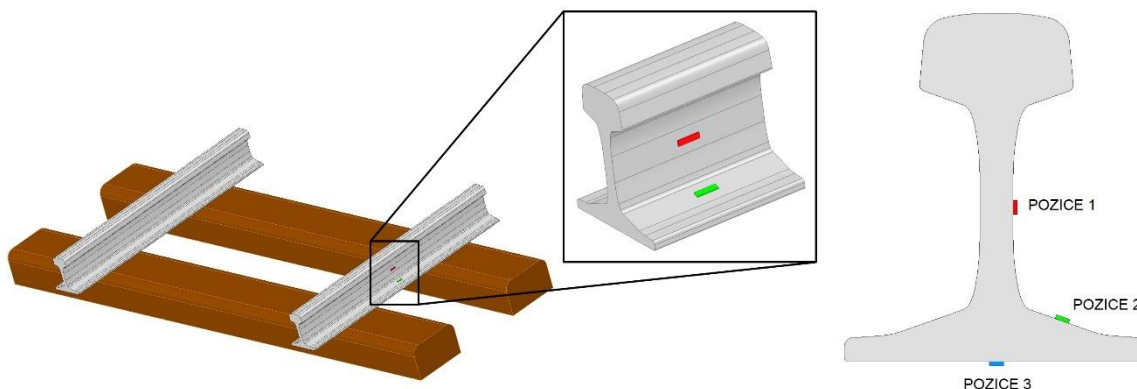
Mechanické a piezoelektrické vlastnosti použitých materiálů jsou zobrazeny v Tab. 6. Kolejnice se vyrábí z vysokopevnostní oceli, tudíž použijeme mechanické vlastnosti oceli. Protože dále budeme kolejnici modelovat pomocí elementu SOLID226, je ještě potřeba oceli přiřadit piezoelektrické vlastnosti. Piezoelektrické nábojové konstanty jsou nulové, tudíž tato matice bude prázdná, ale relativní permitivitu je potřeba zadat. Aby nám nevznikal elektrický náboj v kolejnici, musí být relativní permitivita řádově větší než relativní permitivita MFC snímače. Materiálové vlastnosti MFC snímače již byly popsány při homogenizaci a hodnoty jednotlivých veličin jsou uvedeny v kapitole 5.1, tudíž použijeme tyto hodnoty.

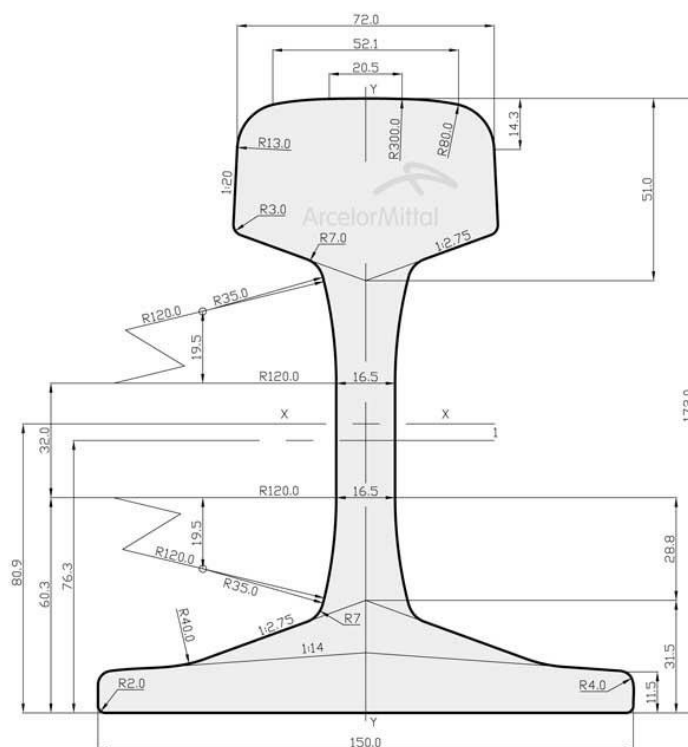
Tab. 6 Materiálové vlastnosti [29]

		Kolejnice		MFC snímač	
Hustota	[kg/m ³]	ρ_K	7850	ρ_P	5540
Modul pružnosti v tahu	[GPa]	E_K	210,0	E_{P1}	31,6
				E_{P2}	17,1
				E_{P3}	9,5
Poissonovo číslo	[–]	μ_K	0,3	μ_{P12}	0,4
				μ_{P23}	0,2
				μ_{P13}	0,4
Modul pružnosti ve smyku	[GPa]	G_K	80,7	G_{P12}	4,9
				G_{P23}	2,5
				G_{P13}	2,4
Piezoelektrická nábojová konstanta	[pC/N]	–	–	d_{P31}	-173
				d_{P32}	-150
				d_{P33}	325
Relativní permitivita	[–]	ε_{rK}^T	100000	ε_{rP}^T	2253

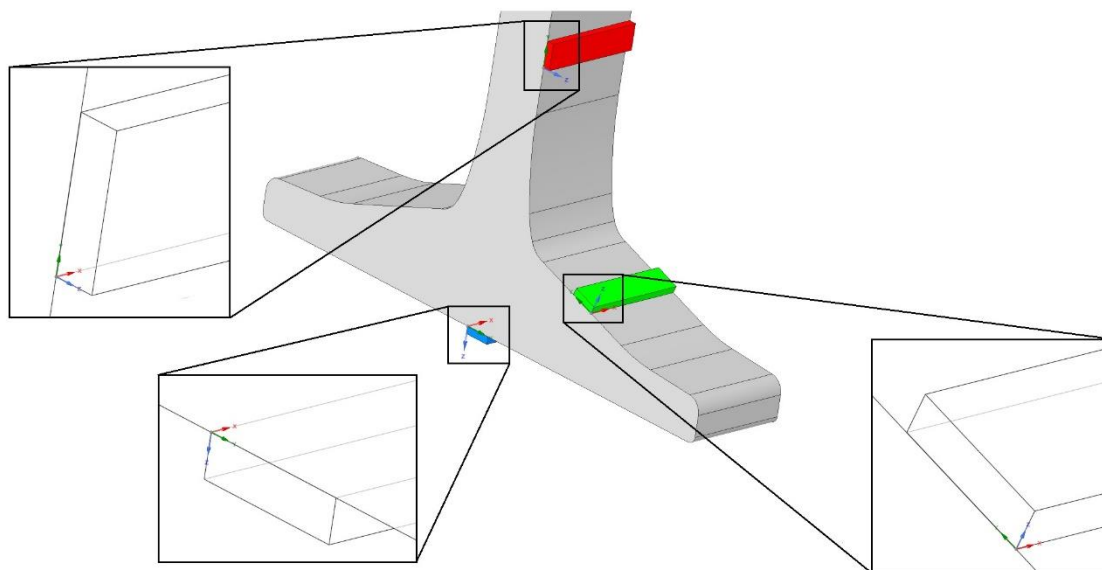
6.1.4 Model geometrie

Modelovat celý železniční svršek by bylo velmi komplikované a následná síť by byla velmi složitá, což by se projevilo na výpočetní složitost a délce výpočtu. Proto bylo potřeba model co nejvíce zjednodušit. Na Obr. 30 v detailu vidíme pouze to podstatné, co je potřeba vymodelovat, jelikož dynamiku železničního svršku budeme řešit pomocí jednoduchých elementů. Tudíž podval, pražce, tlumící podložku, ani upínací systém nebude třeba modelovat.

**Obr. 30** Model geometrie a umístění MFC snímačů



Dalším velmi významným prvkem v modelu, který musíme přidat, je MFC snímač. Z Obr. 30 je patrné, že MFC snímač lze umístit do více míst na kolejnici. Z tohoto důvodu je nutné provést analýzu, na které místo je z hlediska vzniklého napětí snímač nejlepší umístit. V této práci se zaměříme na tři různé pozice. Na první pozici (červená) je MFC snímač na stojně kolejnice. Dále můžeme umístit MFC snímač na vrchní část paty kolejnice, to bude pro nás druhá pozice (zelená). Třetí pozice (modrá), kam může být MFC snímač umístěn, je na spodek kolejnice přímo pod stojnu. Pro správný výpočet vzniklého napětí je důležité správně zvolit souřadnicový systém vzhledem k zadaným piezoelektrickým konstantám. Homogenizace MFC snímače byla prováděna se snímačem pracujícím v módu d31, je tedy vhodné aby osa z byla osou, kde vzniká napětí. Díky konstrukci modelu musí být osa z ve směru od jedné elektrody k druhé. Jelikož ale má každý snímač jiné umístění vzhledem ke globálnímu souřadnicovému systému kolejnice, je nutné potřeba v místě každého MFC snímače vytvořit lokální souřadnicový systém. Ten lze v programu ANSYS vytvořit jednoduchým příkazem. Abychom mohli výsledky následně porovnávat, je také potřeba mít stejnou orientaci všech lokálních souřadnicových systémů. Počátek lokálního souřadnicového systému se tedy nachází v jednom z rohů MFC snímače na kolejnici. Osa z vždy směřuje od spodní elektrody (která je na kolejnici) k horní elektrodě směrem od kolejnice. Osa x vždy zachovává stejný směr s globální osou x . Směr osy y se tedy přizpůsobí podle umístění počátku, ale vždy bude směřovat po kratší hraně snímače. Zobrazení jednotlivých lokálních souřadnicových systémů můžeme vidět na Obr. 32.



Obr. 32 Lokální souřadnicové systémy

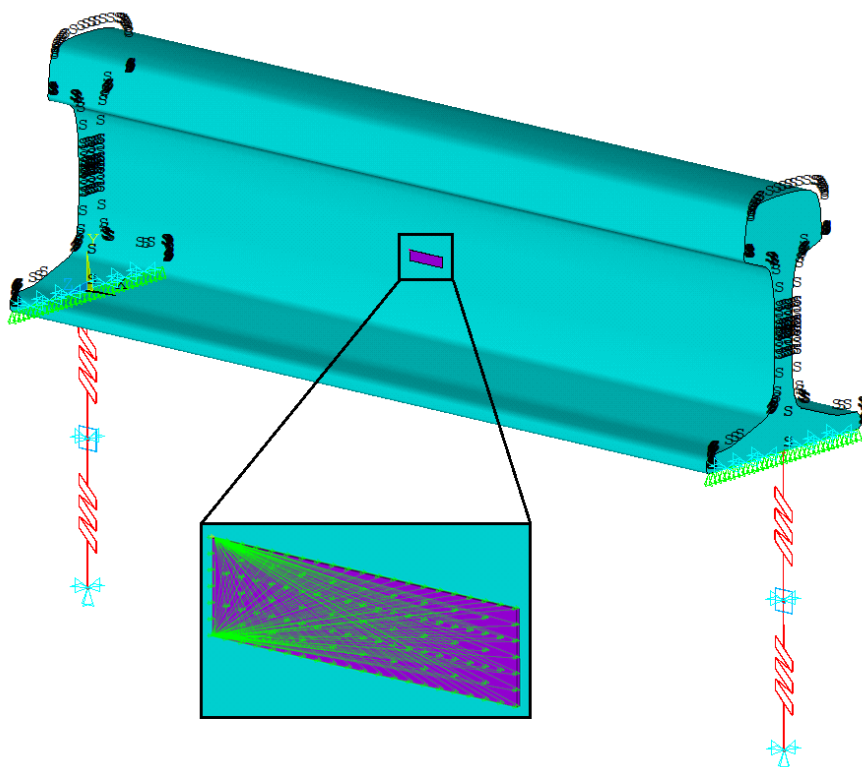
6.1.5 Okrajové podmínky

Volba okrajových podmínek musela být taková, aby bylo zohledněno reálné chování kolejnice. Jednotlivě zvolené okrajové podmínky lze také vidět na Obr. 33. Jelikož tento model obsahuje pouze úsek kolejnice mezi dvěma pražci, musí být na krajní plochy kolejnice zadána okrajová podmínka symetrie.

Kolejnice je pevně spojena s pražci pomocí upínacího zařízení, tudíž na spodní čáry krajních ploch musí být předepsány podmínky zamezení pohybu v ose x a z . Jediný možný pohyb je tedy povolen v ose y . Jelikož je pražec a další dynamické prvky modelovány pouze zjednodušeně a připojeny ke kolejnici pouze v jednom místě, tak musí být ještě na spodní hrany kolejnice přidán coupling posuvu v ose y .

Aby správně fungovala dynamika kolejové svršku v modelu, musíme také na tyto prvky aplikovat správné okrajové podmínky. Jelikož se může pražec prohýbat ve směru osy y , v ostatních směrech tomu musí být zabráněno. Celý model je zakotven v zemi, tudíž na spodním uzlu pod pražcem zadáme vetknutí – zabránění posuvu a rotací ve všech osách.

Poslední důležitou okrajovou podmínkou je správné nastavení elektrického potenciálu. Na spodní i horní plochu MFC snímače představující elektrody musí být zadán coupling okrajové podmínky elektrického napětí. Poté je nutné do jednoho z uzlů na spodní elektrodě zadat nulové napětí.



Obr. 33 Okrajové podmínky

6.2 Modální analýza

Cílem modální analýzy bylo zjistit, na jakých frekvencích může kmitat kolejnice. Je potřeba určit první vlastní frekvenci samotné kolejnice, jelikož tato frekvence bude při průjezdu vlaku dominantní, i když se projeví i další vyšší frekvence. Při první vlastní frekvenci by také měl vznikat největší elektrický potenciál mezi elektrodami MFC snímače, ale toto bude ověřeno až při harmonické analýze.

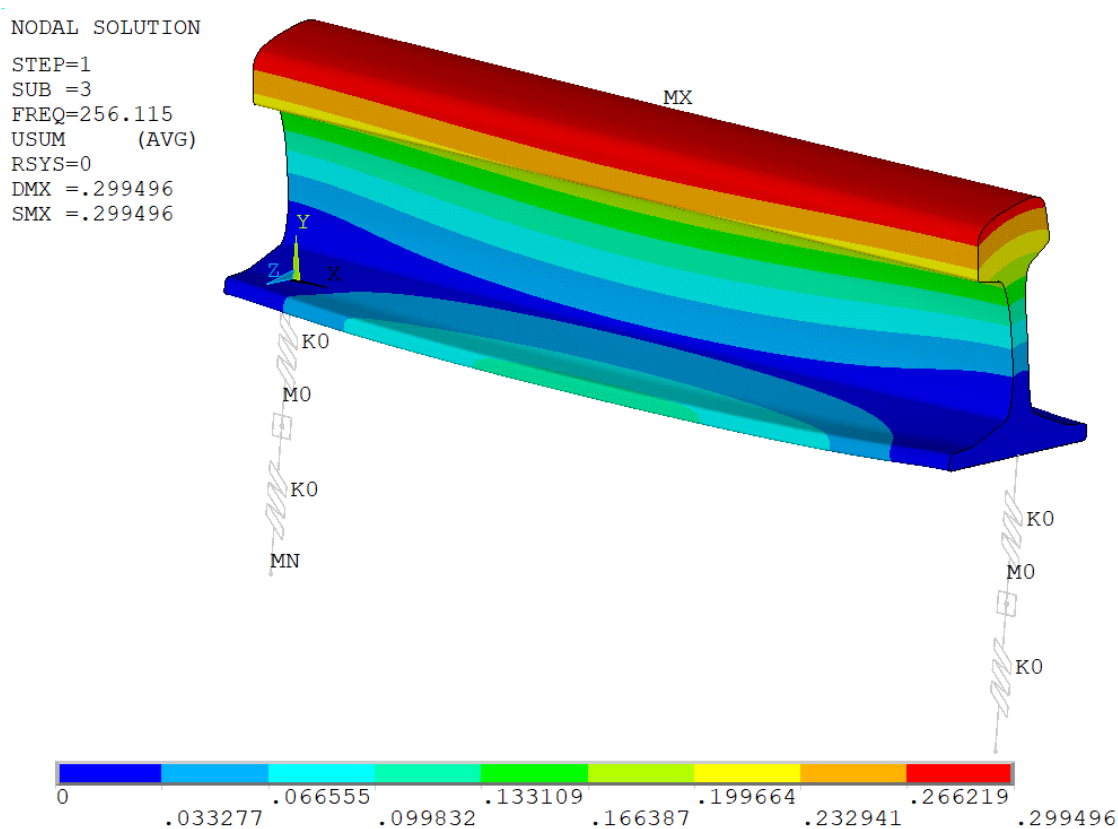
Vytvořený numerický model mohl být pro výpočet modální analýzy zjednodušen. Jelikož v modální analýze se projevuje vliv hmoty a tuhosti vazeb, lze zanedbat MFC snímač a vypustit jej z modelu. Dynamické prvky by neměly mít vliv na frekvence samotné kolejnice, ale dojde ke vzniku dalších frekvencí, které budou způsobeny právě dynamickými prvky.

Pro výpočet byla použita Block Lanczos metoda a bylo stanoveno prvních 20 vlastních frekvencí a tvarů. Z výsledků uvedených do Tab. 7 je patrné, že některé tvary opravdu souvisí pouze s dynamikou kolejového svršku a pak jsou zde tvary, kde dochází pouze ke kmitání kolejnice. Při vyšších frekvencích už dochází ke kombinaci kmitání všech prvků. Jsou zde ale i tvary kmitů, které by v realitě jistě nenastaly, protože model kolejnice má délku pouze 600 mm, kdežto v realitě má kolejnice mnohem větší délku. Tyto tvary a příslušné frekvence tedy nejsou v této práci uvedeny.

První vlastní frekvence samostatné kolejnice je tedy 256 Hz a jedná se o ohybový tvar, jak můžeme vidět na Obr. 34. V místech, kde se nachází pražce, se kolejnice vůbec nedeformuje a uprostřed se kolejnice mírně prohýbá vlivem ohybu celé hlavy kolejnice.

Tab. 7 Výsledky modální analýzy

Mód	Frekvence	Co kmitá
1.	78 Hz	Dynamické prvky
2.	256 Hz	Kolejnice
3.	561 Hz	Dynamické prvky a kolejnice
4.	1283 Hz	Kolejnice
5.	1489 Hz	Kolejnice
6.	1837 Hz	Kolejnice

**Obr. 34** První vlastní tvar kmitání kolejnice – 256 Hz

Následně na modální analýzu naváže harmonická analýza a výsledky modální analýzy by měly korespondovat s výsledky harmonické analýzy, kdy by se při daných frekvencích měla objevit špička či alespoň nárůst hodnot oproti ostatním frekvencím.

6.3 Harmonická analýza

Harmonická analýza bude velmi důležitým nástrojem, protože s její pomocí lze analyzovat, které místo na kolejnici je nejvýhodnější vzhledem k zisku elektrické energie. Proto bude harmonická analýza provedená v každém zvoleném místě, poté pro různé velikosti MFC snímače a následně ještě pro různá natočení vláken.

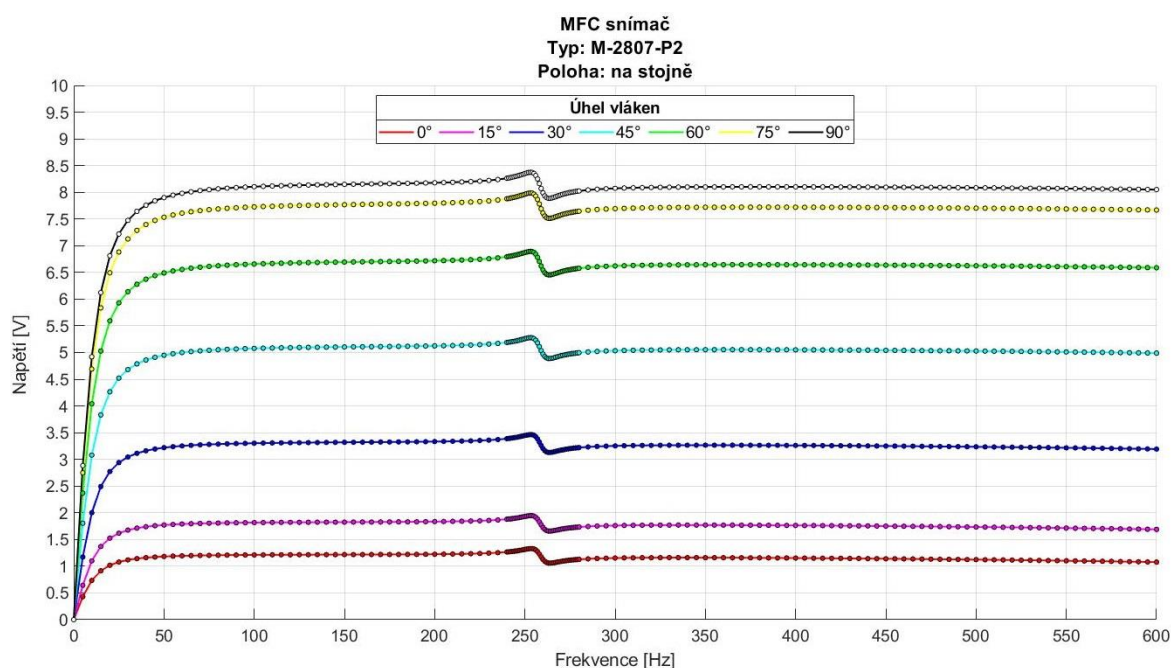
Základem pro správné provedení harmonické analýzy je znát frekvence, ve kterých se pohybuje kmitání, abychom vhodně nastavili rozsah frekvencí a nemuseli procházet velké spektrum. Díky tomu snížíme časovou a výpočetní náročnost prováděné analýzy. Také je zde již potřeba zadat buzení. V tomto případě se bude jednat o sílu vzniklou projíždějícím vlakem. Pokud to zjednodušíme, tak zatížení od vlaku uvažujeme jako bodovou sílu v místě, kde se nachází MFC snímač. Její velikost si spočítáme z váhy lokomotivy, která může dosahovat hmotnost 88 tun. Každá lokomotiva má 4 nápravy, z nichž každá náprava má 2 kola, tudíž hmotnost se rovnoměrně rozloží a hmotnost v jednom kole je 11 tun. Sílu jednoduše vynásobíme tíhovým zrychlením a vyjde nám, že síla působící na kolejnici od jednoho kola je $F = 107\,910\text{ N}$.

Při řešení harmonické analýzy byla použita metoda *full harmonic*, která vždy počítá harmonickou analýzu pro danou budící frekvenci, jejíž rozsah lze nastavit. Vzhledem k vyšší výpočtové náročnosti byly budící frekvence nastaveny v rozmezí pouze 0–600 Hz s nerovnoměrným rozdělením. Blízko první vlastní frekvence kolejnice byl krok jemnější, a to 1 Hz v rozmezí 240–280 Hz. Ve zbytku celého rozsahu byl krok nastaven na 5 Hz. Hodnota poměrného útlumu byla zvolena jako standardní hodnota pro ocel, tedy 0,02.

Byla provedena vždy série harmonických analýz pro danou polohu MFC snímače pro různé natočení vláken. Hodnoty natočení vláken byly nastaveny od 0° do 90° s krokem 15°, kde tento úhel znamenal natočení směru vláken od osy x (tedy v podélném směru kolejnice).

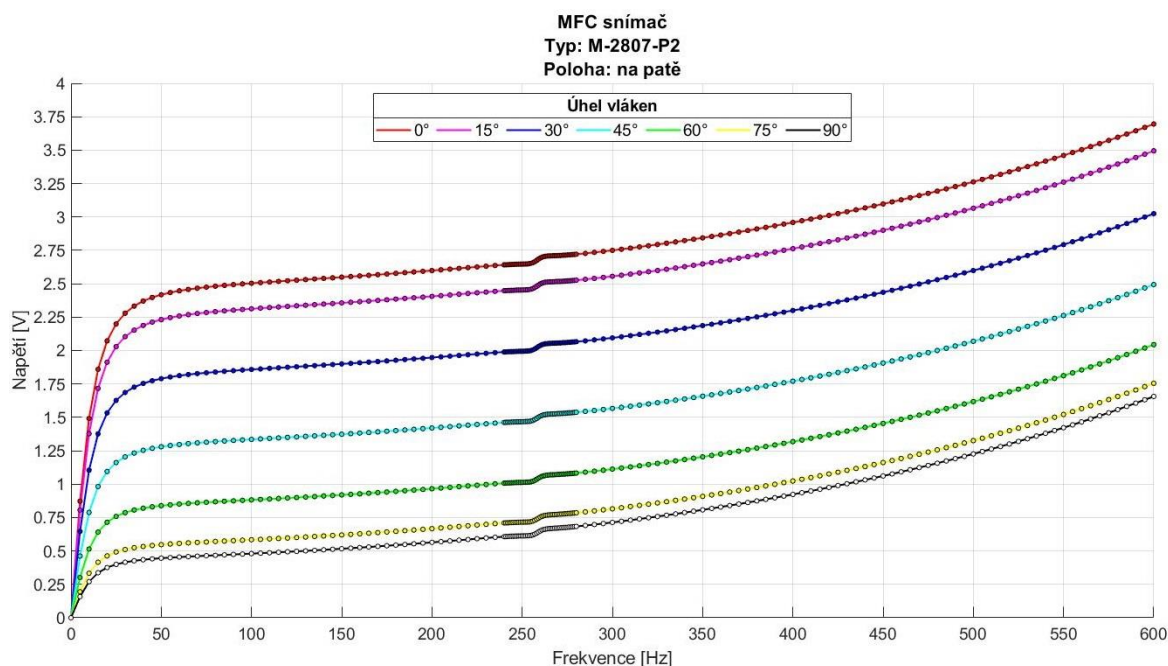
6.3.1 Výsledky harmonické analýzy

Průhyb kolejnice u všech počítaných konfigurací vycházel totožný, což znamená, že máme model dobře nastavený a je tedy možné porovnávat hodnoty napětí u jednotlivých typů konfigurací. Na Obr. 35, Obr. 36 a Obr. 37 jsou zachyceny výsledky amplitudy napětí z harmonických analýz pro jednotlivé polohy MFC snímače. Z výsledků je patrné, že okolo první vlastní frekvence kolejnice (256 Hz) dochází v porovnání s ostatními frekvencemi

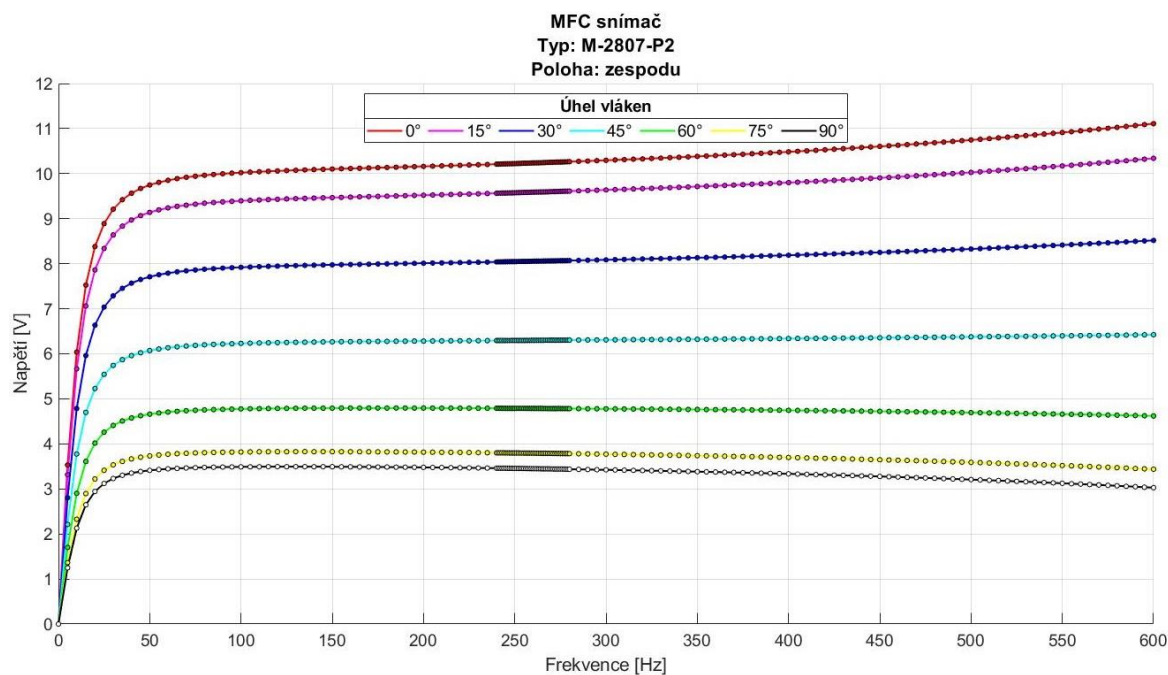


Obr. 35 Porovnání výsledků harmonické analýzy pro pozici 1

k určitým změnám, ale není zde výrazná špička či nárůst napětí, jak tomu bývá při kmitání jednoduché soustavy na první frekvenci. Je to způsobeno více faktory, jelikož kolejnice je součástí kolejového svršku, který má svoji dynamiku, což se ve výsledcích projeví. Jelikož velikost získaného napětí na MFC snímači je závislé na deformaci, pak také rozhoduje umístění snímače na kolejnici a proto jsou důležité vlastní tvary kmitání kolejnice. To vše se pak projeví ve výsledcích a můžeme si všimnout, že pro pozici snímače zespod kolejnice není vidět přechod první vlastní frekvence kolejnice, tak jako na dalších dvou polohách (na stojně a na patě kolejnice).



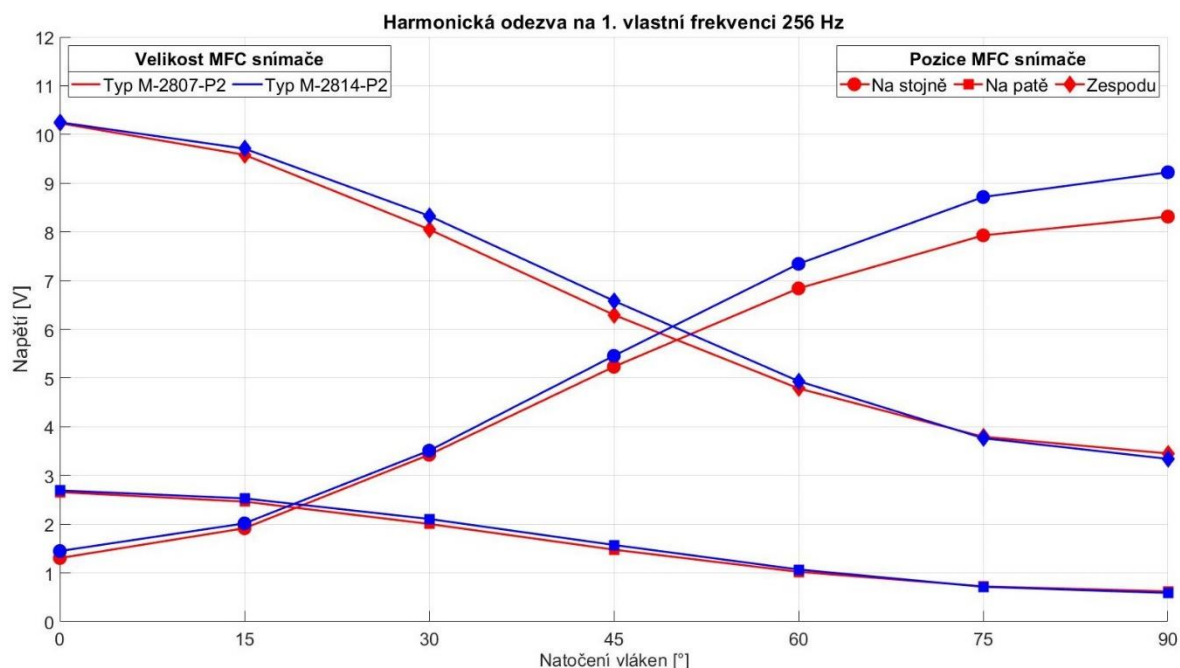
Obr. 36 Porovnání výsledků harmonické analýzy pro pozici 2



Obr. 37 Porovnání výsledků harmonické analýzy pro pozici 3

6.4 Zhodnocení analýzy a výběr konfigurace MFC

Z jednotlivých harmonických analýz byly tedy vybrány pouze hodnoty napětí pro první vlastní frekvenci kolejnice, protože tyto hodnoty budou v následné tranzientní analýze dominantně zastoupeny. Pro porovnání a zhodnocení, která konfigurace bude nejvýhodnější vzhledem k získanému napětí, jsou hodnoty napětí vykresleny do jednoho grafu na Obr. 38.



Obr. 38 Porovnání výsledků harmonické analýzy jednotlivých konfigurací MFC snímače pro první vlastní tvar kmitání kolejnice (256 Hz)

Když se podíváme na Obr. 38, tak na první pohled vidíme, že velikost MFC snímače nebude příliš hrát roli v tom, jestli získáme více energie. Zásadní naopak ale je pozice snímače na kolejnici a také natočení vláken.

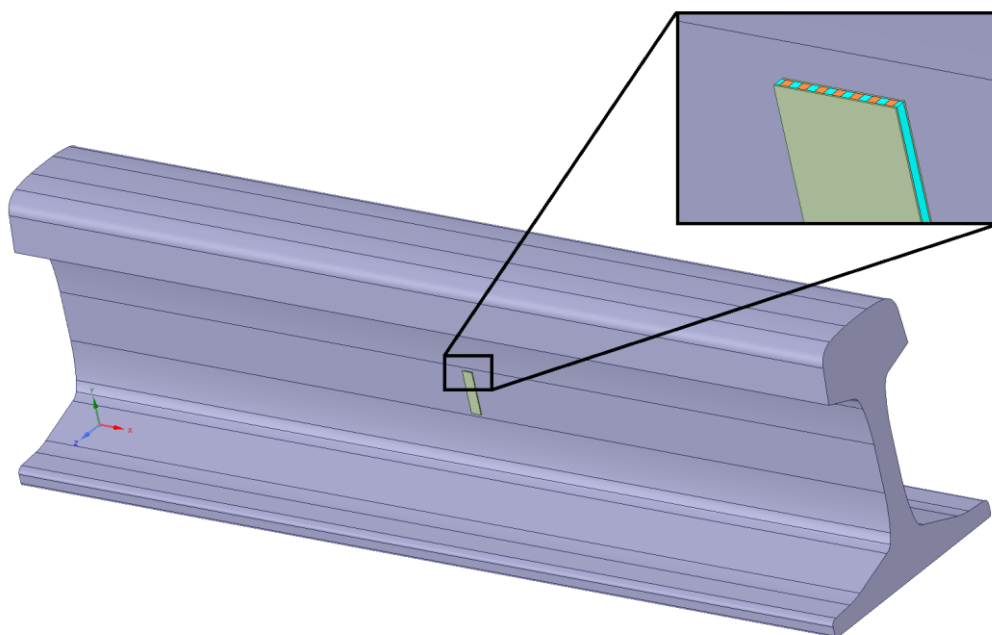
Na první pozici, tj. na stojně, jsme schopni získat největší napětí při natočení vláken 90°, tj. MFC snímač je přilepen delší stranou kolmo k zemi. Tento výsledek lze přepokládat, protože při tomto umístění na stojně dochází vlivem vlastního tvaru kmitání kolejnice k větším deformacím na koncích snímače a tudíž k většímu zisku napětí.

Na druhé pozici, tj. na patě, je tomu oproti první pozici právě naopak. Největší napětí získáme při natočení vláken 0°, tj. MFC snímač je přilepen delší stranou vodorovně se zemí. Opět k tomu lze najít jednoduché vysvětlení pomocí vlastního tvaru kmitání kolejnice. Z něj je patrné, že v tomto případě nebudou deformace tak velké jako na stojně a při natočení vláken 0° bude průhyb ve středu snímače velký oproti krajům snímače, tudíž zisk napětí bude větší než při natočení vláken 90°.

U třetí pozice, tj. zespodu, je nutné dát zvýšenou pozornost na zhodnocení výsledků, protože mohou být klamavé. Při pohledu na první vlastní tvar kolejnice je totiž zřejmé, že deformace snímače v tomto místě je téměř nulová, je zde pouze průhyb, který nezpůsobí rozdíl potenciálů na elektrodách. To je patrné i z Obr. 37, kdy máme celý rozsah frekvencí a kolem první vlastní

frekvence kolejnice zde není žádná špička či přechod. K deformaci snímače samozřejmě dojde, avšak projeví se až při vyšších frekvencích, kdy tyto frekvence už se při tranzientní analýze tolik neprojeví.

Z jednotlivých průběhů napětí na Obr. 38 je tedy zřejmé, že jednoznačně největší napětí jsme schopni získat při umístění snímače zespod kolejnice při natočení vláken 0° . Avšak je nutné brát v potaz i fakt, že úloha bude řešena hlavně v časové oblasti, kdy hraje velkou roli zejména tvar kmitání, a také je zde ta skutečnost, že je často vyvolán pouze první vlastní tvar kmitání, případně další, ale ty už jsou zastoupeny méně. Z tohoto důvodu je výhodnější vybrat konfiguraci, kdy MFC snímač bude umístěn na stojně kolejnice a vlákna budou mít natočení 90° , protože zde dochází k velkým deformacím snímače při první vlastním tvaru kmitání, který bude při tranzientní úloze dominantní. Jak tato konfigurace bude reálně vypadat na kolejnici lze vidět na Obr. 39.



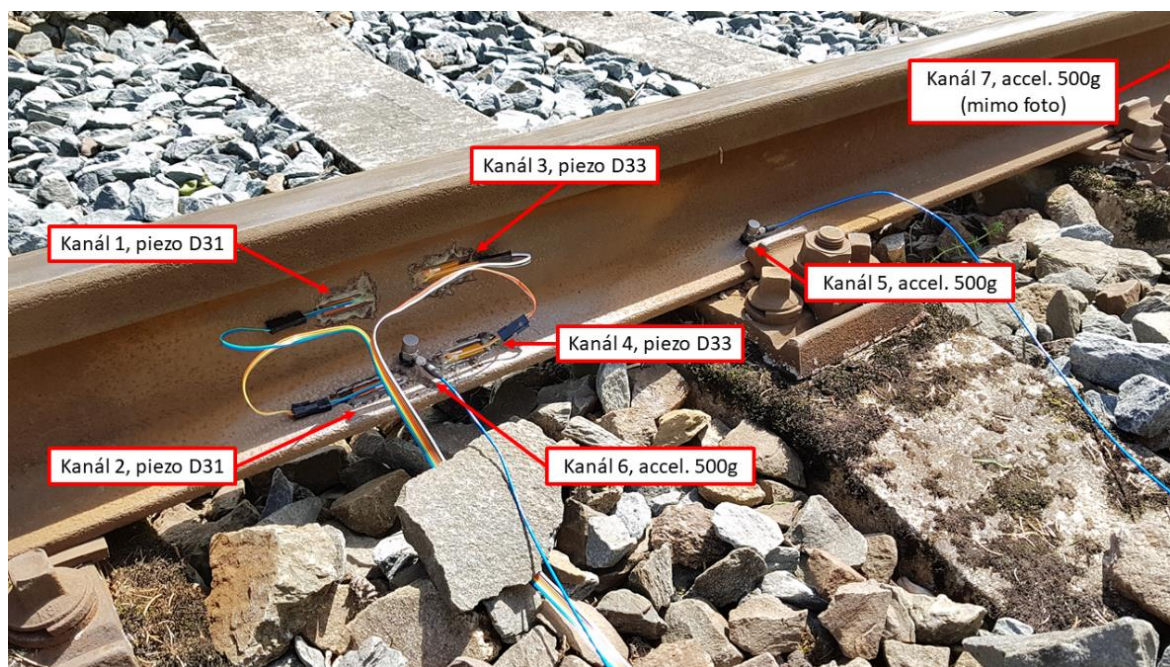
Obr. 39 Vhodná konfigurace MFC snímače

7 Porovnání numerického modelu s experimentem

Obsahem této kapitoly je provedení tranzientní analýzy na vytvořeném numerickém modelu. Také byl proveden experiment na reálné soustavě, jehož výsledky jsou následně porovnány s výsledky tranzientní analýzy.

7.1 Popis experimentu

Než byl samotný experiment proveden, muselo dojít k jeho přípravě, která spočívala v nalepení jednotlivých snímačů do vybraných míst na kolejnici. Měření napětí se provádělo pomocí MFC snímačů od firmy SmartMaterial ve dvou místech dvěma různými typy snímačů, které pracují v módu D31 a D33 (katalogový název M-2807-P1 a M-2807-P2 [28]). Prvním místem, na kterém byly tyto dva snímače přilepeny, je stojna kolejnice a druhé místo je pak na vrchní straně paty kolejnice. Také bylo měřeno zrychlení pomocí akcelerometrů v místě, kde byly nalepeny piezosnímače, dále v místě pražce a pak ještě ve vzdáleném místě od piezosnímačů. Rozmístění jednotlivých snímačů na kolejnici můžeme vidět na Obr. 40.



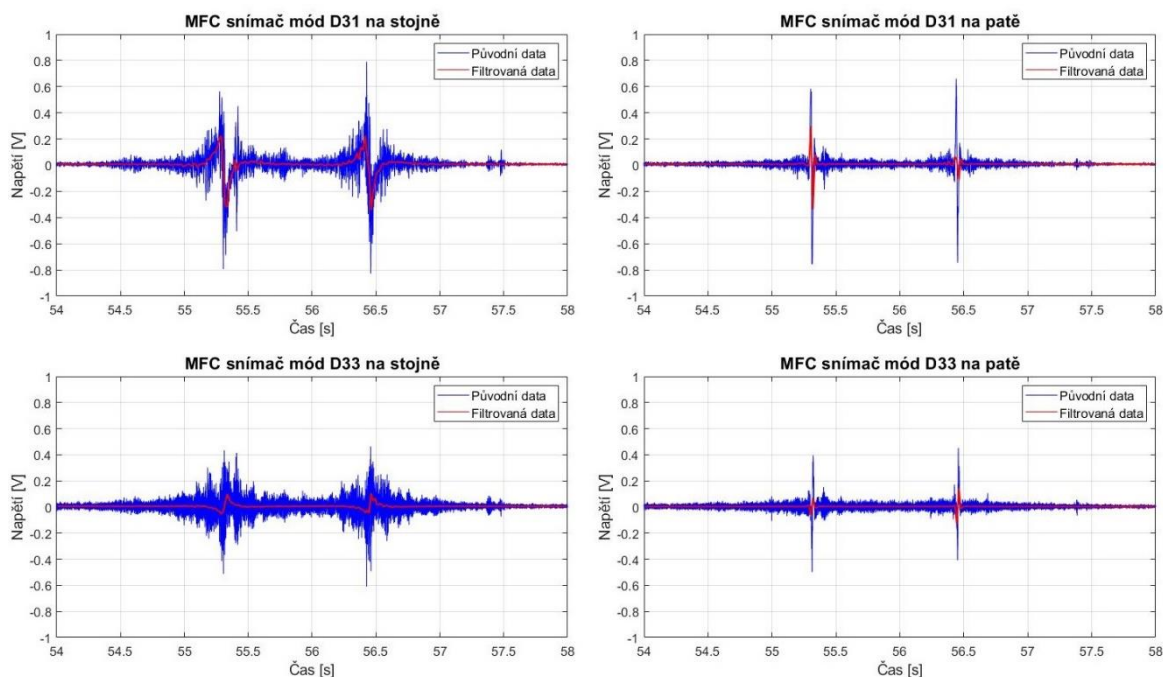
Obr. 40 Rozmístění snímačů při experimentu

Experiment byl prováděn 30. 5. 2019 na vedlejší koleji v Hanušovicích a během něj byla provedena dvě měření. Při prvním měření projížděla lokomotiva zleva doprava a k piezosnímačům byl připojen dělič napětí s hodnotou $1/17$. U druhého měření lokomotiva projížděla opačně, tj. zprava doleva, a k piezosnímačům byl připojen dělič napětí, kde byla nastavena ale jiná hodnota a to $1/2$. Výsledky měření a fotografie poskytl doktorand Ing. Filip Kšica.

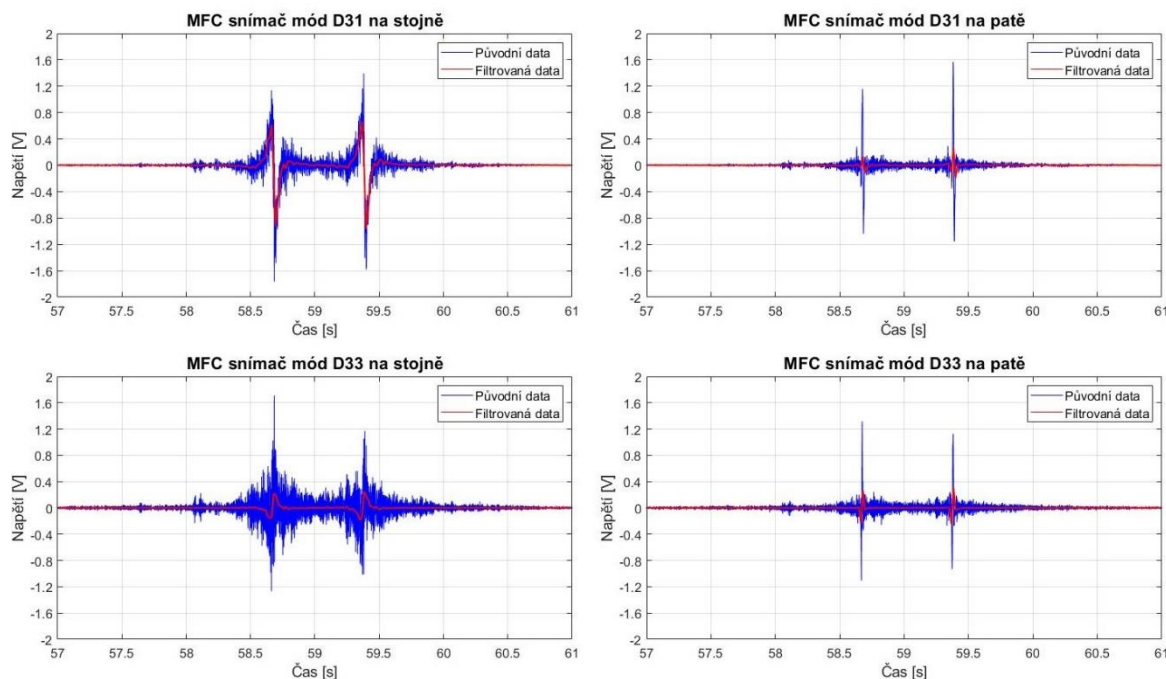
7.2 Výsledky experimentu

Na Obr. 41, resp. Obr. 42 jsou zobrazena získaná napětí z prvního, resp. druhého měření experimentu. Jsou zde data ze všech piezosnímačů nalepených na kolejnici. Při pohledu

na jednotlivé křivky si můžeme všimnout, že data jsou značně zašumělá, proto použijeme jednoduchý filtr k tomu, abychom dostali čistou křivku. Aplikujeme jednoduchou operaci, která spočívá ve zprůměrování 200 hodnot, a následně vykreslíme pouze výslednou hodnotu. Jelikož je vzorkovací frekvence vysoká, nedojde tak ke ztrátě informace v signálu.



Obr. 41 Výsledky 1. měření experimentu



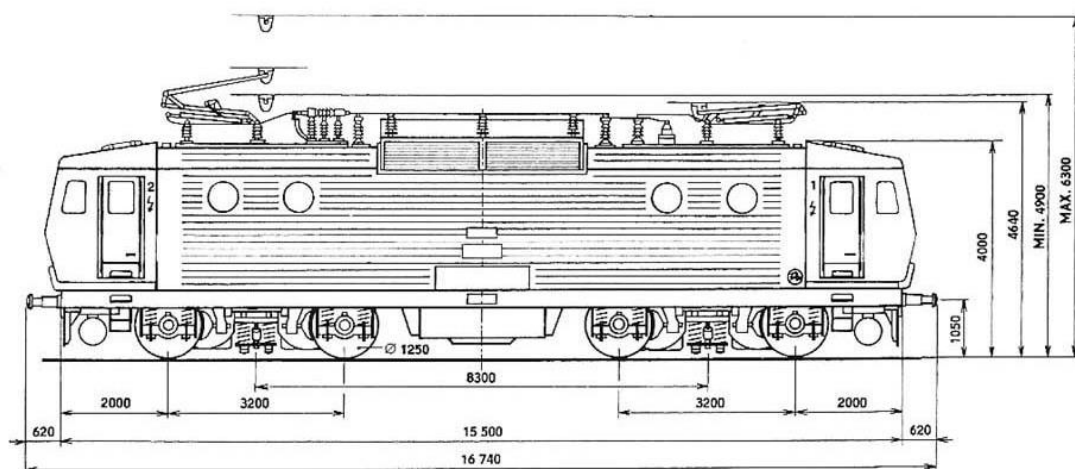
Obr. 42 Výsledky 2. měření experimentu

Z grafů na obrázcích vidíme, že při druhém měření jsme získali nepatrně větší napětí než při prvním měření, což je způsobeno větší rychlostí lokomotivy. To že je rychlost při druhém

měření větší můžeme také vidět pouhým okem z grafu, kdy špičky napětí jsou blíže u sebe než u prvního měření. Aby bylo možné stanovit přesnou hodnotu, je nutné znát vzdálenost náprav a také čas ve špičkách napětí, který jde z Matlabu zjistit. Rychlost vlakové soupravy pro nás v tuto chvíli není podstatná a budeme ji řešit až při porovnávání s numerickým modelem. Dále stojí za zmínku to, že získané napětí pomocí piezosnímačů s pracovním módem D31 je o něco větší než D33, tento rozdíl je patrnější na stojně, což je způsobeno vlastními tvary kmitání kolejnice popisovanými v předchozí kapitole. Na patě kolejnice je tomu přesně naopak, piezosnímače s módem D33 dosahují ve špičkách větších napětí než s módem D31, ale rozdíl hodnot je velmi malý.

7.3 Tranzientní analýza

Při řešení tranzientní analýzy byl použit stejný model jako při harmonické analýze, akorát bylo nutné nastavit sílu od lokomotivy tak, že bude simulovat projíždění lokomotivy přes místo, kde je piezosnímač. S tím se pojí nutnost znát dostatečně dobře okrajové podmínky. Zaprvé musíme znát hmotnost lokomotivy, ta již byla potřeba pro výpočty u harmonické analýzy, proto použijeme stejnou hmotnost a to 88 tun. Z této hmotnosti poté po přepočtu na jedno kolo vychází síla $F = 107\,910\text{ N}$. Dále je potřeba znát vzdálenost jednotlivých kol a náprav lokomotivy, abychom mohli nastavit průjezd jednotlivých kol v přesně daném čase tranzientní analýzy. Jako příklad můžeme vzít asi nejrozšířenější typ československé elektrické lokomotivy od firmy Škoda Plzeň, lokomotivu řady 363, jejíž rozměry můžeme vidět na Obr. 43. Z rozměrů lokomotivy tedy můžeme spočítat vzdálenost jednotlivých kol. Mezi prvním a druhým kolem stejně jako mezi třetím a čtvrtým kolem je vzdálenost 3200 mm a mezi druhým a třetím kolem je vzdálenost 5100 mm. Mohli bychom dále přidávat i vagóny nebo další lokomotivy, ale jako příklad dostatečně stačí pouze jedna lokomotiva. Poslední věc, která bude ovlivňovat zadávání sil od jednotlivých kol, je rychlost vlaku, resp. lokomotivy. V dnešní době je nevyšší povolená rychlost na českých tratích 160 km/h, ale jen na určitých úsecích. Na většině úseků takovéto rychlosti vlaky ani nedosahují, protože na to není postavená železniční síť. Lokomotiva vybraná pro výpočet dosahuje maximální rychlosti pouze 120 km/h [35] a proto budeme v zadávání síly od lokomotivy počítat s touto rychlostí. Pokud uvažujeme rychlost 120 km/h, tak přes místo, kde se nachází piezosnímač, přejedou všechny 4 kola lokomotivy za 0,345 s.



Obr. 43 Lokomotiva řady 363 - rozměry [35]

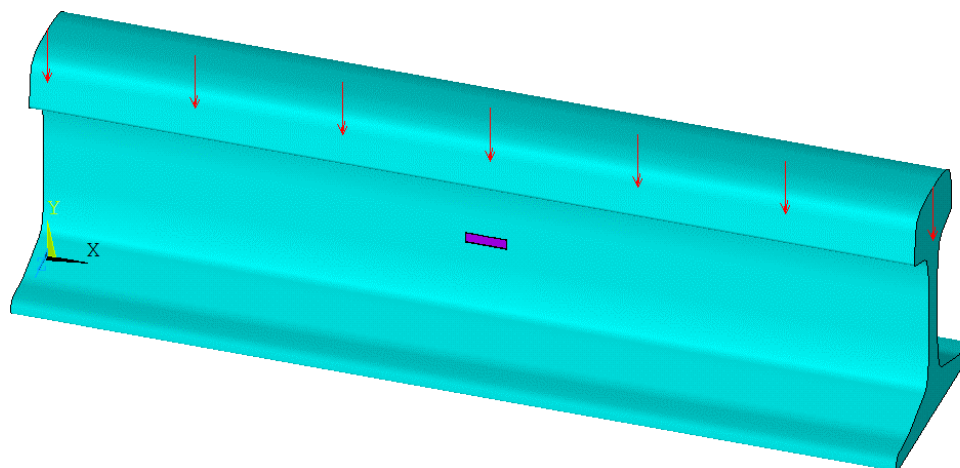
Důležité je správné nastavení parametrů tranzientní analýzy, mezi které patří časový krok a celkový čas, poté je potřeba v určitém čase zadávat do určitých míst sílu od působícího kola lokomotivy. Celkový čas tranzientní analýzy byla 1 sekunda. Pro výpočet jednotlivých časů, ve kterých se zadávala síla, byla použita jednoduchá rovnice (7.12) pro výpočet rychlosti, kde byla známa rychlost a dráha se měnila podle toho, jaké kolo zrovna přes kolejnici přejíždělo. Síla byla postupně zadávaná do 7 míst (viz Obr. 44), což simulovalo reálný průjezd lokomotivy po kolejnici. Vzdálenost jednotlivých míst, kde působí síla, je 100 mm. Z toho lze spočítat časový krok pomocí rovnice (7.12). Pro rychlost 120 km/h vychází časový krok $\Delta t_{120} = 0,003$ s.

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (7.12)$$

Tranzientní analýza byla řešena pomocí loadstepů (LS) a substepů (SS) a bylo potřeba vzhledem k rychlosti vlaku a časovému kroku správně zadat hodnotu sil tak, aby simulovaly průjezd lokomotivy touto rychlostí. Tab. 8 ukazuje, do jakého místa byla síla zadána a jaký byl aktuální substep a čas.

Tab. 8 Nastavení parametrů tranzientní analýzy

Průjezd kola 1			Průjezd kola 2			Průjezd kola 3			Průjezd kola 4		
SS	Δs [mm]	Δt [s]	SS	Δs [mm]	Δt [s]	SS	Δs [mm]	Δt [s]	SS	Δs [mm]	Δt [s]
10	0	0,030	42	3200	0,126	93	8300	0,279	125	11500	0,375
11	100	0,033	43	3300	0,129	94	8400	0,282	126	11600	0,378
12	200	0,036	44	3400	0,132	95	8500	0,285	127	11700	0,381
13	300	0,039	45	3500	0,135	96	8600	0,288	128	11800	0,384
14	400	0,042	46	3600	0,138	97	8700	0,291	129	11900	0,387
15	500	0,045	47	3700	0,141	98	8800	0,294	130	12000	0,390
16	600	0,048	48	3800	0,144	99	8900	0,297	131	12100	0,393

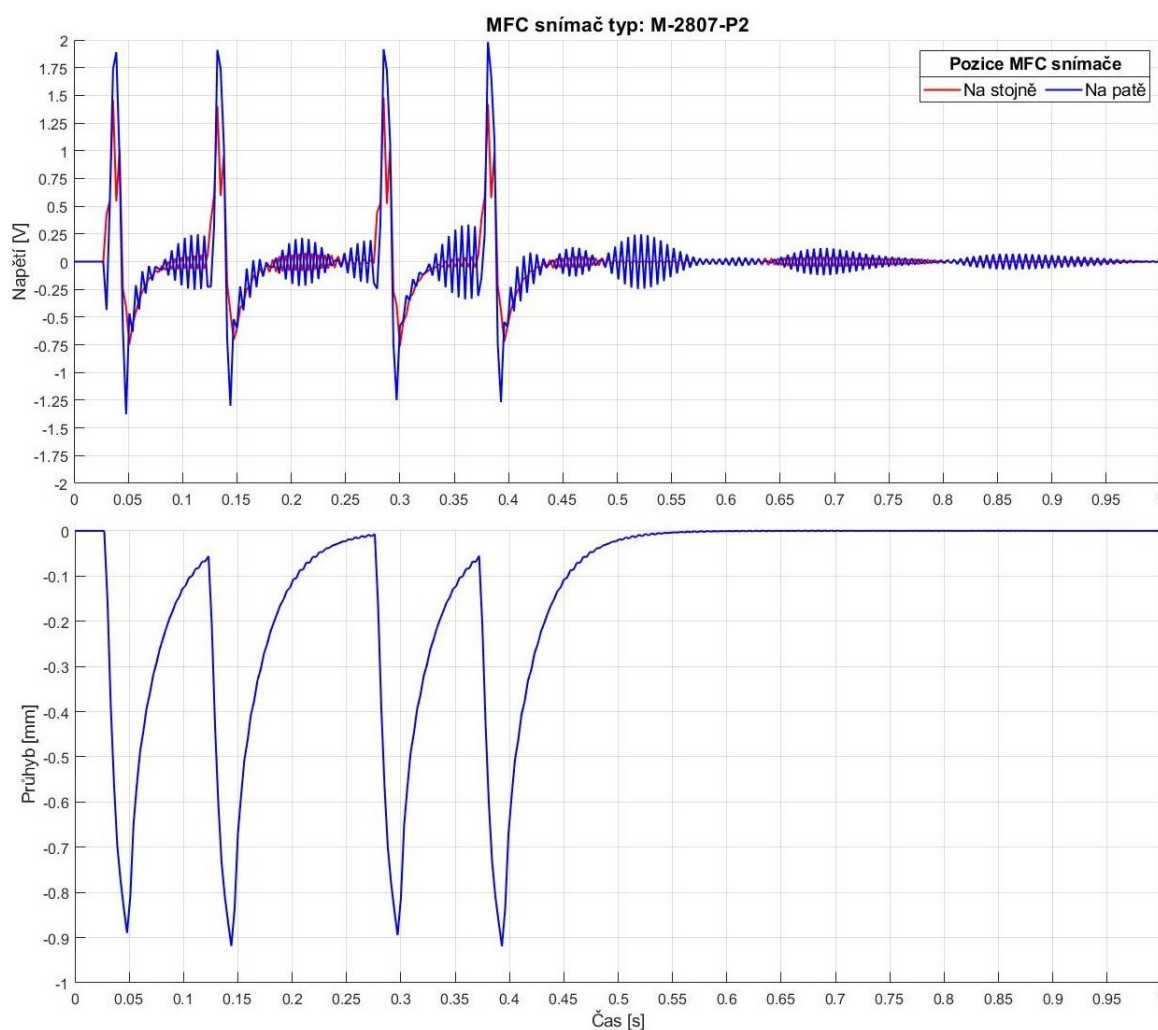


Obr. 44 Místa zadávání sil při tranzientní analýze

7.3.1 Výsledky tranzientní analýzy

Na Obr. 45 můžeme vidět dva grafy pro rychlost lokomotivy 120 km/h, které jsme pomocí tranzientní analýzy získali. Jedná se o graf získaného napětí pomocí MFC snímače přilepeného na kolejnici a druhý graf zobrazuje průhyb kolejnice v místě snímače. V grafech jsou uvedeny dvě křivky, které odpovídají dvěma různým pozicím snímače, a to na stojně a patě kolejnice.

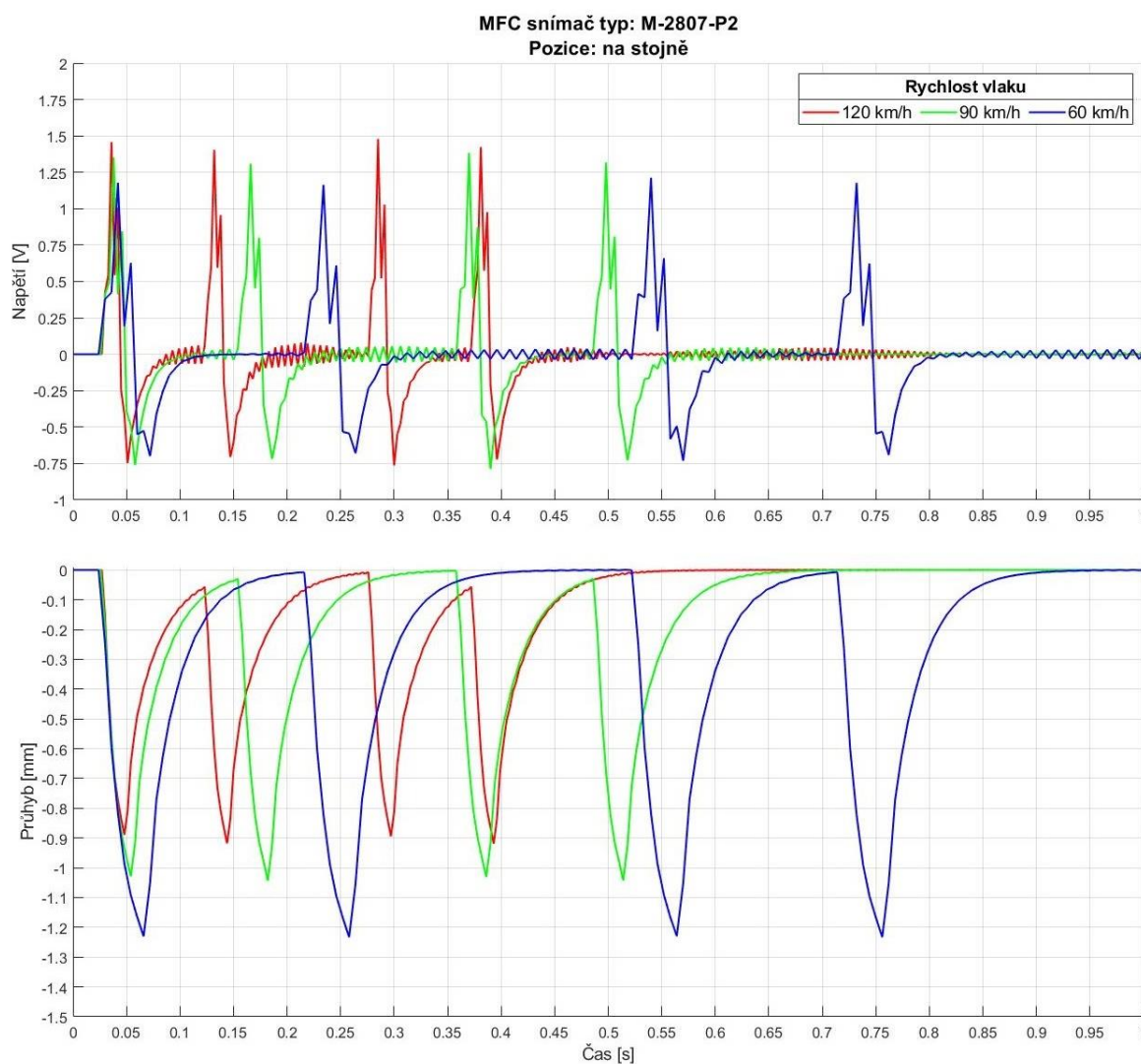
Když se podíváme na průběh průhybu, je pro obě pozice stejný, což lze také očekávat, jelikož se jedná o stejné modely. Maximální hodnoty 0,9 mm průhyb dosahuje ve chvíli, kdy se síla nachází přímo nad místem snímače. Naopak získané napětí se u obou modelů liší. Napětí získané pomocí MFC snímače na patě je nepatrně větší než na stojně. Na patě dosahuje získané napětí maximální hodnoty necelé 2 V, kdežto pomocí MFC snímače získáme na stojně maximální napětí 1,5 V. Tyto hodnoty tedy odpovídají hodnotám získaným při analýze vhodného umístění pomocí harmonické analýzy. Na grafu napětí si můžeme také povšimnout zvláštního jevu, který se zde objevil, a tím jsou kopečky napětí. Toto je způsobeno tím, jakým způsobem byly zadávány síly na kolejnici. Jelikož byla síla vždy v určitém místě zadána a následně odstraněna, došlo k vzájemnému ovlivnění jednotlivých sil. Nakonec to vyústilo k jejich interferenci, což mělo za následek vznik těchto kopečků.



Obr. 45 Výsledky tranzientní analýzy pro stejné pozice MFC snímače jak při experimentu

7.3.2 Vliv rychlosti vlaku

Výsledky tranzientní analýzy v předchozí kapitole jsou řešeny pro rychlost vlaku 120 km/h a jelikož celá kolejová trať má určitou dynamiku, tak zde bude mít určitý vliv právě rychlost vlaku. Jak moc velký vliv bude nastíněno v této kapitole. Vycházíme z úplně stejného modelu, jen použijeme pokaždé jinou rychlost. S tím souvisí změna časového kroku a postupného zadávání sil, protože při menší rychlosti přejede vlak kolejnici za delší čas. Pro porovnání jsme zvolili hodnoty rychlostí 120 km/h, 90 km/h a 60 km/h. Jejich časové kroky vychází $\Delta t_{120} = 0,003$ s, $\Delta t_{90} = 0,004$ s a $\Delta t_{60} = 0,006$ s. Poté jsme si vytvořili stejnou tabulku (jako Tab. 8) i pro ostatní rychlosti.



Obr. 46 Vliv rychlosti vlaku

Na Obr. 46 můžeme vidět výsledky tranzientních analýz pro jednotlivé rychlosti, kde byl vykreslen průběh získaného napětí a průhybu v čase. Z prvního grafu průhybu je patrné, že při menší rychlosti dosahuje průhyb větších hodnot, což je dáno tím, že vlaku trvá déle, než přes kolejnici přejede, a síla působí déle, což má za následek vznik většího průhybu. Z grafu napětí je viditelné, že při větší rychlosti získáme větší napětí, ale rozdíl není až tak velký. Rychlost by musela poklesnout mnohem výrazněji, aby byl rozdíl zásadní.

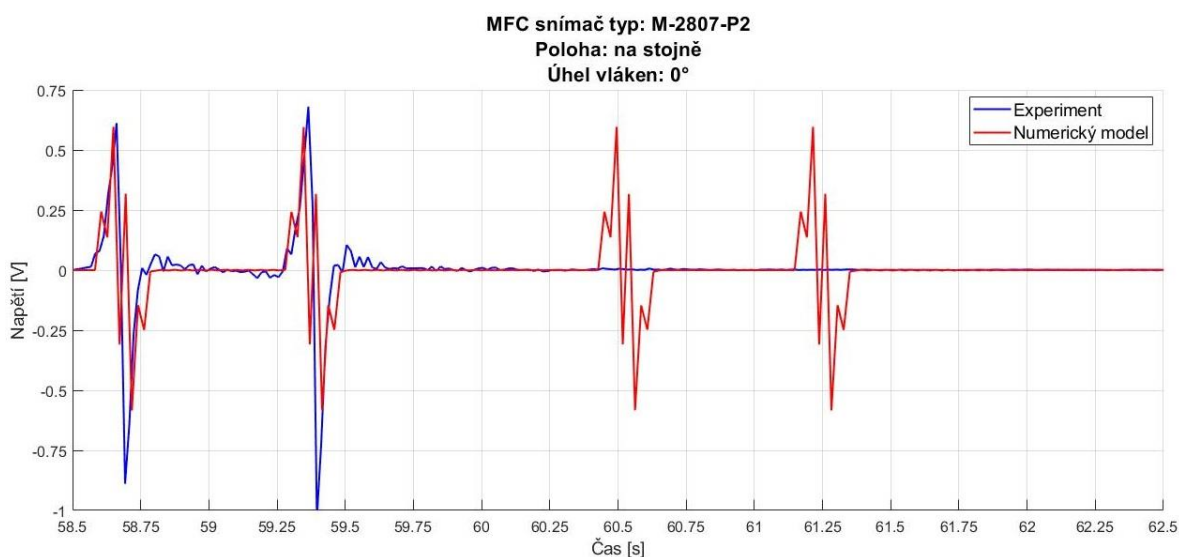
7.4 Porovnání experimentu s tranzientní analýzou

K tomu abychom dokázali srovnat výsledky experimentu a výsledky numerického modelu z tranzientní analýzy je potřeba, aby všechny parametry, které výsledky ovlivňují, byly stejné nebo alespoň blízké. Proto je nejprve si potřeba z výsledků experimentu zjistit, jaká byla rychlost přejíždějící lokomotivy. Stačí porovnat pouze výsledky z jednoho měření a k tomu bude vhodnější provést porovnání na druhém měření. Zaměříme se tedy na získané napětí z grafu pro MFC snímače v módu D31 na stojně na Obr. 42. Abychom zjistili rychlost lokomotivy, musíme určit časy ve dvou po sobě jdoucích špičkách. Jelikož je originální signál velmi zašumělý, budeme tyto hodnoty určovat z filtrovaného signálu. Poté již pomocí známé vzdálenosti kol jednoduše spočítáme rychlost lokomotivy pomocí rovnice (7.12):

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{3200 \cdot 10^{-3}}{59,37 - 58,66} = 4,44 \text{ m/s} \cdot 3,6 = 16 \text{ km/h}$$

Nyní tedy zbývá správně nastavit tranzientní analýzu tak, aby zadávání síly odpovídalo vypočítané rychlosti lokomotivy při experimentu. Půjde se podle stejného postupu, jaký byl proveden v předchozí kapitole při vlivu rychlosti. Nejprve je potřeba pro tuto rychlost spočítat časový krok a následně podle něho vytvořit tabulku pro nastavování parametrů tranzientní analýzy. Časový krok pro rychlost 16 km/h má hodnotu $\Delta t_{16} = 0,0225 \text{ s}$. Abychom mohli porovnat výsledky v grafické podobě, tak je nutné k hodnotám času z tranzientní analýzy přičíst hodnotu času z experimentu, ve které začíná průjezd lokomotivy. Tímto časem je pro druhé měření 58,5 s. Nyní již můžeme porovnat získané napětí pomocí těchto dvou způsobů.

Z grafu na Obr. 47 je patrné, že špičky se překrývají, tudíž rychlost byla nastaven správně. V čem se ale tyto dvě křivky nepatrně liší, je velikost. V kladných hodnotách dosahují napětí téměř totožných hodnot kolem 0,6 V, naopak v záporných hodnotách dosahuje vyššího napětí experimentální měření a to o více jak 50% mezi 0,9 – 1 V. U experimentálního měření dochází při průjezdu druhého kola k malému nárůstu zisku napětí oproti prvnímu, kdežto v numerickém modelu toto chování nepozorujeme, jelikož mezitím dojde k ustálení kmitání kolejnice.

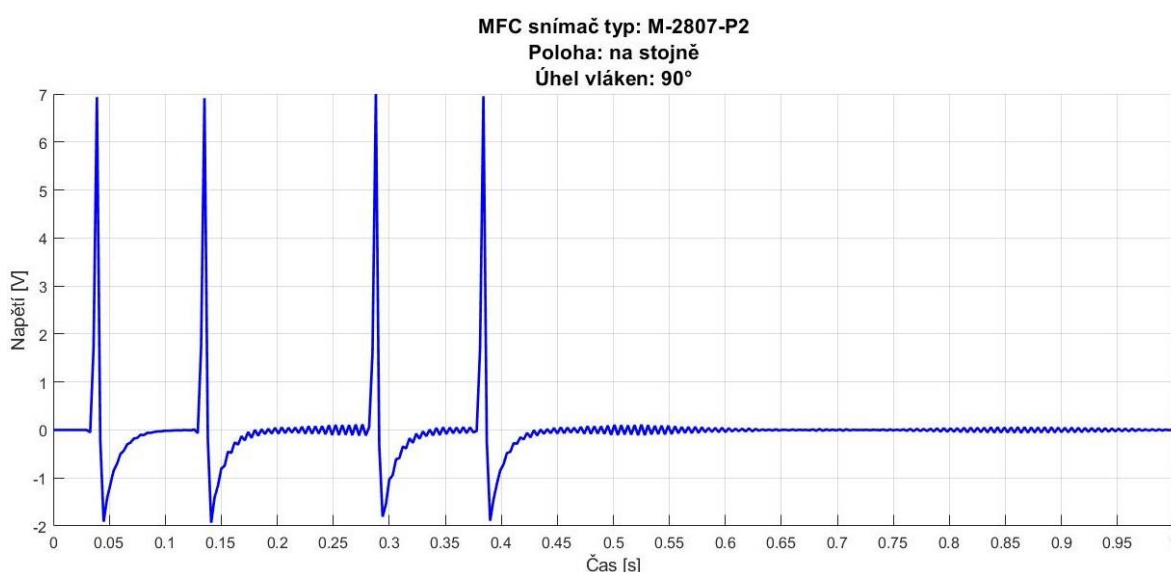


Obr. 47 Porovnání experimentu s numerickým modelem

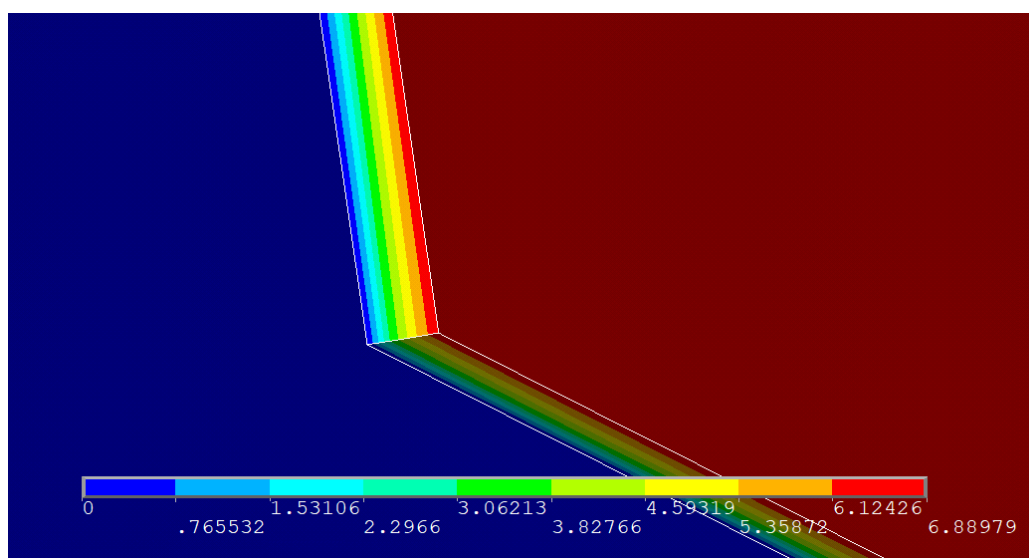
7.5 Výsledky pro vhodnou konfiguraci MFC

V předchozí kapitole jsme na základě harmonické analýzy vybrali jako vhodnou konfiguraci MFC snímače na kolejnici umístěného na stojně pod úhlem 90° . Doposud byl v této kapitole řešen pouze snímač umístěný na stojně a na patě pod úhlem 0° a to hlavně z důvodu porovnání výsledků s experimentem. Nyní se zaměříme na vybranou vhodnou konfiguraci.

Získané napětí pomocí MFC snímače ve zvolené konfiguraci můžeme vidět na Obr. 48. Maximálních hodnot dosahuje napětí ve chvílích, kdy se síla od kola lokomotivy nachází přímo nad snímačem a jejich velikost se blíží 7 V. Průběh výkonu je závislý na napětí, tudíž špiček bude dosahovat ve stejných chvílích a maximální získaný výkon se blíží k $50 \mu\text{W}$. Na Obr. 49 pak vidíme průběh napětí na homogenizovaném MFC snímači pro chvíli, kdy se síla nachází nad snímačem. Je zde patrný lineární průběh napětí mezi elektrodami.



Obr. 48 Výsledky napětí pro vhodnou konfiguraci MFC snímače



Obr. 49 Získané napětí [V] na MFC snímači

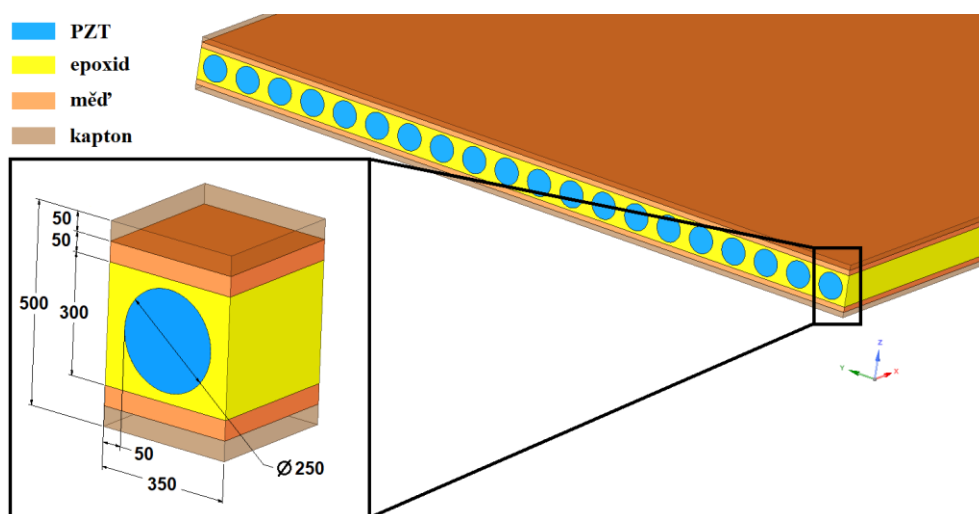
8 Návrh piezokeramického snímače

Jeden z cílů diplomové práce byl po provedeném porovnání různých topologií MFC snímače navrhnout vlastní piezokeramický snímač určitých rozměrů. Návrh tohoto snímače je prováděn primárně kvůli snížení výrobní ceny snímače. Když se totiž podíváme na ceny MFC snímačů na stránkách jejich výrobce Smart Materials [36], tak se ceny pohybují v řádech desítek až stovek euro za jediný snímač, což není levná záležitost. Je zde možnost koupit si pouze jednotlivé piezokeramické vlákna a poté si z nich složit vlastní snímač, který bude ve výsledku levnější. Návrhem struktury piezokeramického snímače se tedy bude zabývat tato kapitola. Poté bude vytvořen numerický model tohoto navrženého piezokeramického snímače a provedena analýza, zda je vytvořené napětí a výkon srovnatelný s MFC snímačem. Nakonec bude zhodnocena vhodnost použití tohoto piezokeramického snímače.

8.1 Struktura piezokeramického snímače

Při návrhu struktury piezokeramického snímače musíme vycházet z dostupných rozměrů PZT vláken výrobce Smart Materials. Na jejich webových stránkách [36] můžeme nalézt nabídku. Výrobce dodává vlákna průměru 105 μm o délce 75 mm, dále 250 a 800 μm o délce 150 mm. V rámci cenové kategorie a výsledné struktury snímače je vhodné zvolit průměr 250 μm .

Celkovou délku a šířku piezokeramického snímače musíme volit s ohledem na rozměry místa, kde budeme tento snímač na kolejnici umísťovat. Je zde tedy více možností, ale tím že nám z porovnání různých topologií vyšla nejlepší pozice na stojně a vlákna pod úhlem 90° (kolmo k zemi), tak se musíme při návrhu řídit místem na stojně. Poté je ještě možnost umístit snímač na stejné místo pod úhlem 0°, kde může být délka vláken větší. Jelikož výrobce dodává vlákna o délce 150 mm, tak je vhodné zvolit takové rozměry, abychom využili celou délku vlákna. Tudíž nejvhodnější délka vláken bude 30 mm, pro úhel natočení 0° ještě můžeme zkusit navrhnout větší délku a to 50 mm, případně 75 mm a provést srovnání. Šířka piezokeramického snímače bude záviset na počtu vláken a mezerách, které mezi jednotlivými vlákny budou. Šířku snímače tedy můžeme nechat stejnou, jako šířku MFC snímače, tedy 7 mm. Pro tuto šířku vychází při velikosti mezery mezi vlákny 100 μm počet potřebných PZT vláken na 20.



Obr. 50 Navržená struktura piezokeramického snímače (rozměry v μm)

PZT vlákna tedy jsou již navrhnutá a můžeme přistoupit ke kompletní struktuře snímače. Vlákna se zalijí do epoxidové pryskyřice. Poté je potřeba připojit měděné elektrody, které budou odvádět vytvořený náboj ve vláknech. A následně je ještě nutné aplikovat ochrannou vrstvu, kterou bude tvořit kaptonová fólie. Celá navržená struktura piezokeramického snímače, včetně detailu na jedno vlákno s rozměry je zobrazena na Obr. 50. V Tab. 9 jsou popsány materiálové vlastnosti jednotlivých komponentů piezokeramického snímače včetně materiálu kolejnice, tyto vlastnosti budou použity při výpočtech tranzientní analýzy.

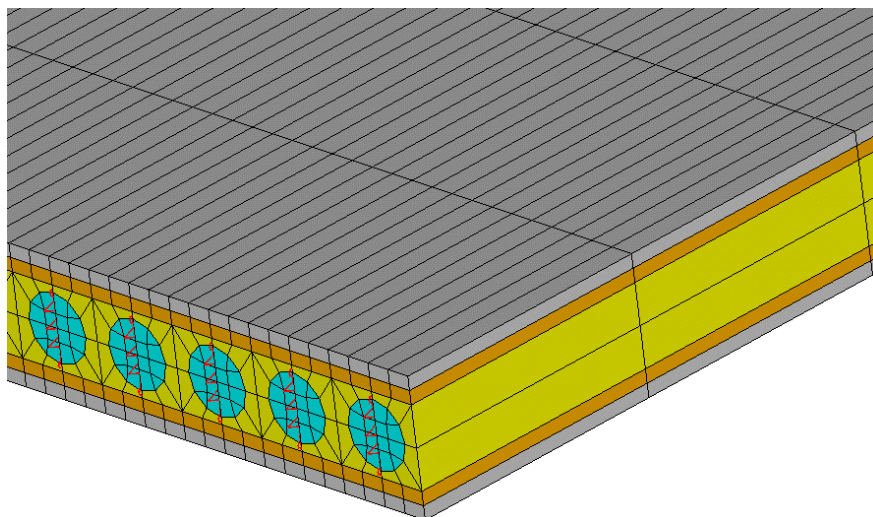
Tab. 9 Materiálové vlastnosti [29]

	Kolejnice	Epoxid	Měď	Kapton	PZT vlákno	
Hustota [kg/m^3]	7850	1150	8960	1410	ρ	5540
Modul pružnosti v tahu [GPa]	210,0	2,8	117,2	2,5	E_1	54,0
					E_2	54,0
					E_3	48,3
Poissonovo číslo [—]	0,3	0,3	0,35	0,34	μ_{12}	0,41
					μ_{23}	0,44
					μ_{13}	0,44
Modul pružnosti ve smyku [GPa]	80,7	1,08	43,1	0,9	G_{12}	19,1
					G_{23}	19,5
					G_{13}	19,5
Piezoel. nábojová konstanta [pC/N]	—	—	—	—	d_{31}	-185
					d_{32}	-185
					d_{33}	440
Relativní permitivita [—]	100000	3,6	100000	100000	ε_{r11}^T	1950
					ε_{r22}^T	1950
					ε_{r33}^T	1850

8.2 Tranzientní analýza

Při řešení tranzientní analýzy navrženého piezokeramického snímače byl použit stejný model jako v předchozí kapitole při řešení tranzientní analýzy MFC snímače, akorát zde musela proběhnout změna v tvorbě geometrie a vytváření sítě z důvodu různé struktury snímačů. Díky tomu, že vlákna a další elementy piezokeramického snímače jsou oproti kolejnici velmi malé, tak bude mít konečnoprvková síť mnoho elementů, a abychom nepřekročili maximální možný počet uzlů daný licencí, je nutné místo využitých elementů SOLID226 použít elementy SOLID5, které fungují úplně stejně, jen mají uzly pouze v rozích krychle, tudíž se celkový počet uzlů rapidně zmenší. Ještě zde je jedna věc, která komplikuje nastavení analýzy. Touto

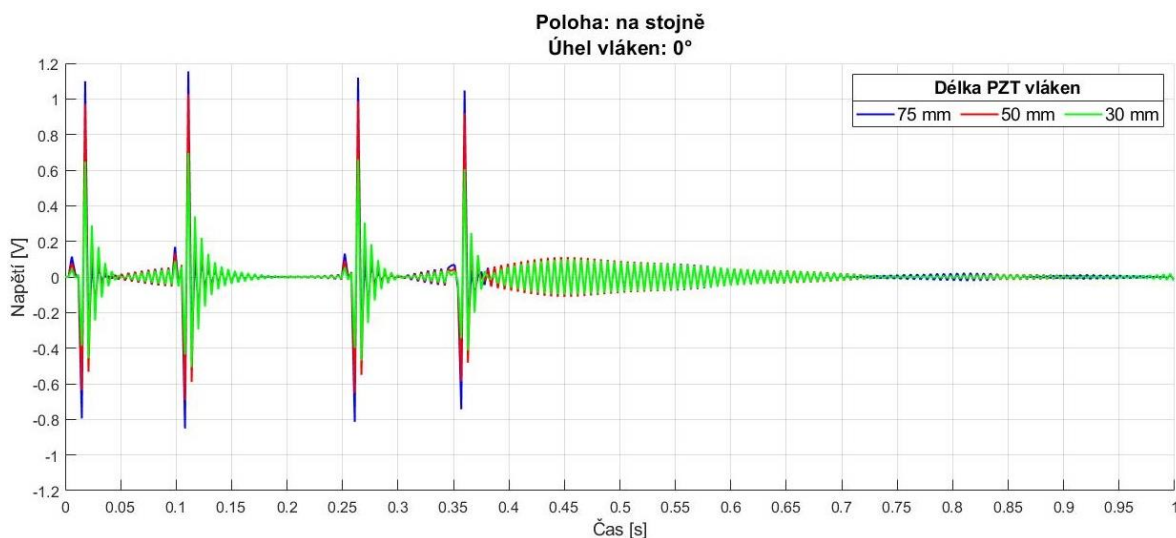
věcí je to, že se nejedná o homogenní piezokeramický materiál, tudíž je potřeba každé vlákno samostatně elektricky uzavřít a vytvořit na jeho koncích coupling. Tudíž zde bude 20 samostatných obvodů, kde se bude generovat napětí (viz Obr. 51). Poté se tedy musí při zpracování výsledků spočítat průměrná hodnota ze všech 20-ti vláken tak, abychom dostali celkové získané napětí z celého piezokeramického snímače. Rychlost lokomotivy budeme uvažovat stejnou jako v předchozí kapitole a to 120 km/h, tudíž časový krok bude $\Delta t_{120} = 0,003$ s a při zadávání sil se budeme řídit Tab. 8.



Obr. 51 Síť elementů piezokeramického snímače

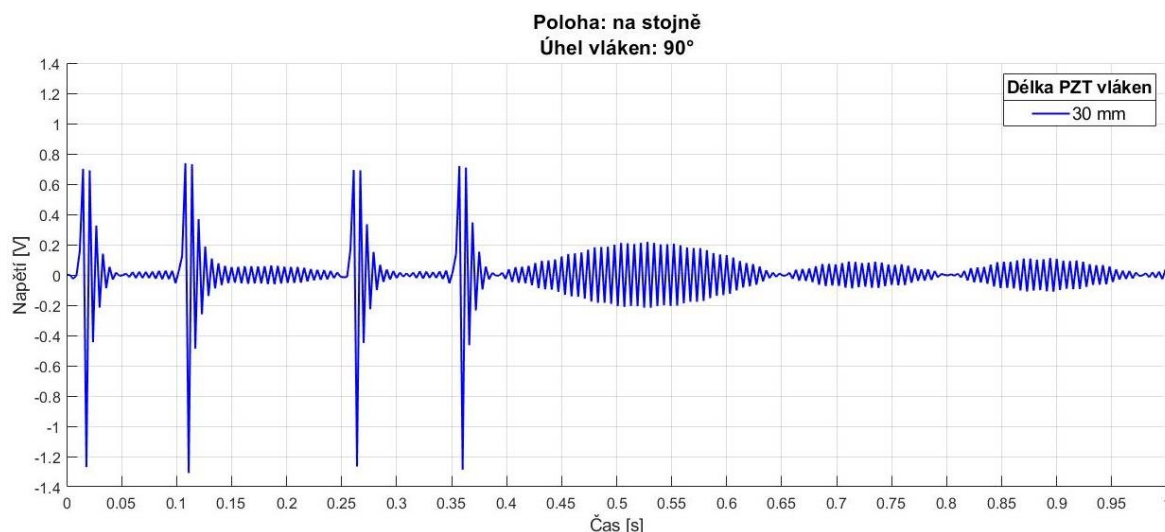
8.2.1 Výsledky tranzientní analýzy

Na Obr. 52 vidíme graf získaného napětí pomocí piezokeramického snímače na stojně kolejnice pod úhlem 0° . V grafu jsou uvedeny tři křivky odpovídající třem různým délkám snímače. Při pohledu na průběh napětí je patrné, že čím je délka vláken větší, tím jsme schopni získat větší napětí. Při délce vláken 75 mm dosahuje špička maxima na 1,1 V, kdežto u kratší délky (30 mm) je maximum pouze asi 0,65 V.



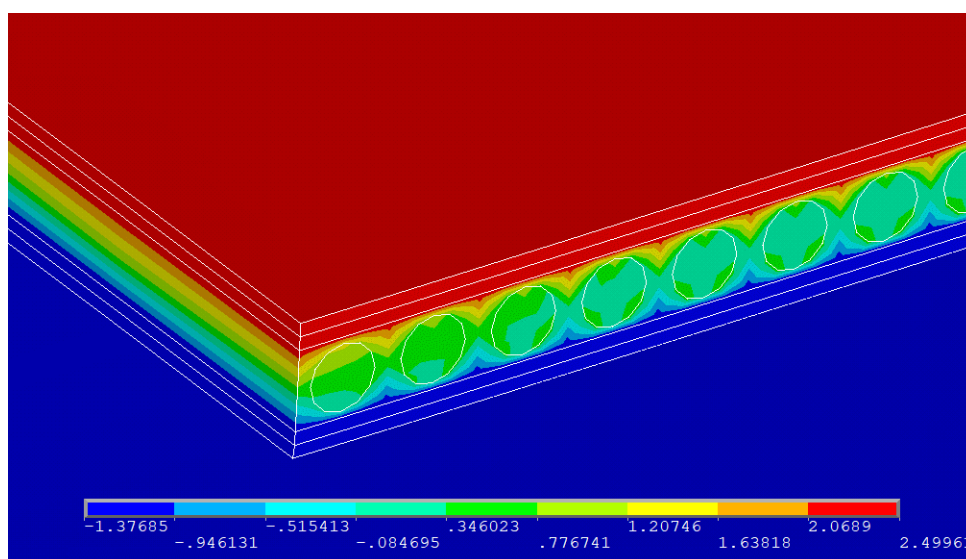
Obr. 52 Výsledky tranzientní analýzy piezokeramického snímače – úhel 0°

V následujícím grafu na Obr. 53 lze vidět získané napětí na piezokeramickém snímači, který je na stejně umístěn vlákny pod úhlem 90° . Při pohledu na průběh grafu vidíme, že ve špičkách dosahuje získané napětí maximální hodnoty kolem 1,3 V, což je u stejné délky vláken asi dvojnásobně více, než při úhlu natočení vláken 0° .



Obr. 53 Výsledky tranzientní analýzy piezokeramického snímače – úhel 90°

Na Obr. 54 můžeme pozorovat, jak vypadá získané napětí přímo na snímači a v jednotlivých vláknech. Obrázek je pořízen v čase 0,015 s, kdy se síla od kola lokomotivy nachází přímo nad snímačem. Průběh napětí skrze piezokeramický snímač zde není úplně lineární, jako tomu bylo u MFC snímače (viz Obr. 49), protože je snímač složen z více materiálů. Můžeme si povšimnout, že spodní a horní měděná elektroda mají mírně rozlišené hodnoty napětí než místa na PZT vláknech v blízkosti těchto elektrod. To je způsobeno tím, že mezi těmito dvěma materiály je ještě epoxid, který má nastavenou nízkou relativní permitivitu. Vlivem toho dochází k malému přenosu náboje přes epoxid do elektrod. Ty mají ale již nastavenou vysokou hodnotu relativní permitivity, takže skrze ně již nedochází k přenosu náboje.

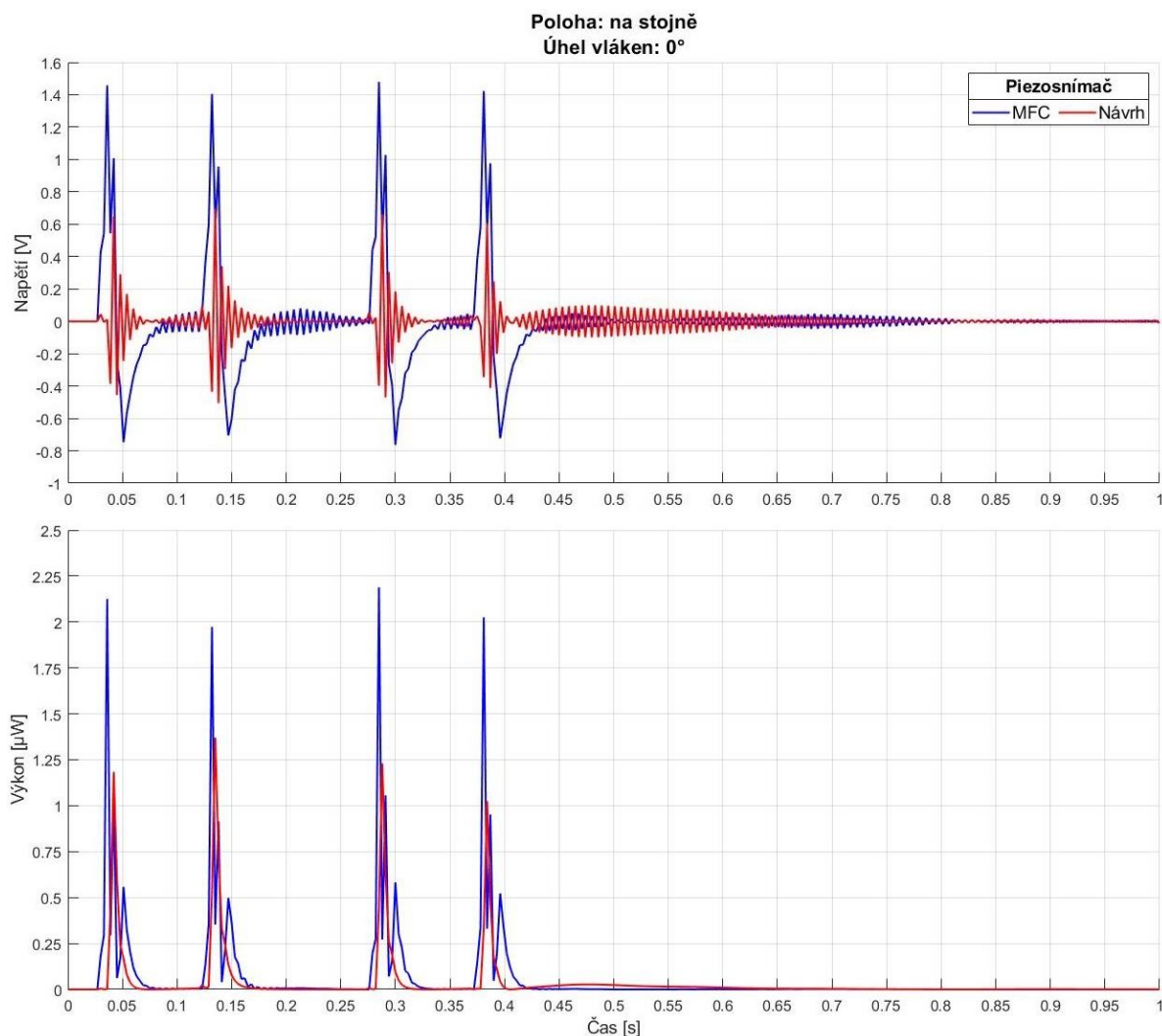


Obr. 54 Získané napětí [V] na piezokeramického snímači – úhel 90°

8.2.2 Porovnání piezokeramického snímače s MFC

Jelikož byly u MFC snímače i navrženého piezokeramického snímače stejně nastavené konfigurace snímačů a parametry tranzientní analýzy, lze tyto dva snímače srovnat podle získaného napětí a výkonu.

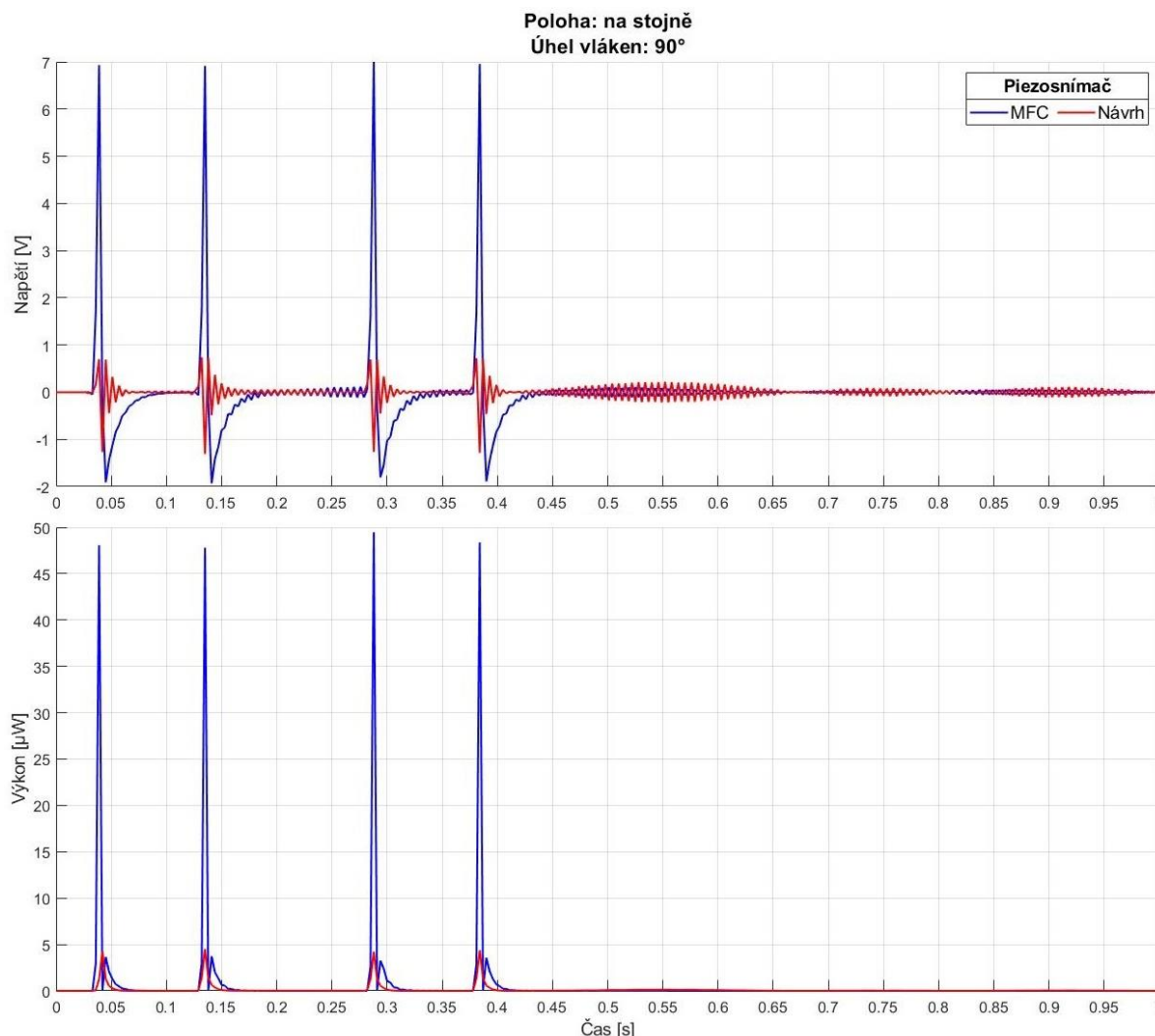
V prvním grafu na Obr. 55 vidíme srovnání obou snímačů s úhlem natočení vláken 0° . MFC snímač zde dosahuje většího získaného napětí i výkonu. Hodnoty napětí pro MFC dosahují kolem 1,4 V a výkonu přes $2 \mu\text{W}$. U navrženého snímače jsou tyto hodnoty menší, napětí dosahuje maxima necelých 0,7 V a výkon kolem $1,2 \mu\text{W}$.



Obr. 55 Porovnání napětí piezokeramického snímače s MFC – úhel 0°

Ve druhém grafu na Obr. 56 vidíme srovnání obou snímačů s úhlem natočení vláken 90° . MFC snímač zde dosahuje mnohem většího získaného napětí i výkonu. Hodnoty napětí pro MFC dosahují až k 7 V a hodnoty výkonu necelých $50 \mu\text{W}$. U navrženého snímače jsou tyto hodnoty mnohem menší, ale pořád srovnatelné s úhlem natočení vláken 0° , napětí dosahuje maxima kolem 1,3 V a výkon necelých $5 \mu\text{W}$. Tento velký rozdíl v napětí a výkonu by mohl být způsoben tím, co již bylo popsáno při výběru vhodné konfigurace, a to tvarem kmitání kolejničky. Tak malé generované napětí u navrženého snímače může zapříčinit také to, že

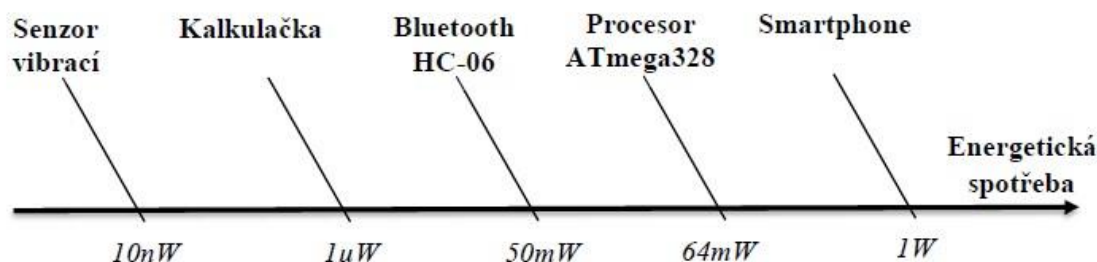
pro výpočet byl u MFC snímače použit homogenizovaný model, zatímco piezokeramický snímač se skládá z několika materiálů. Jsou zde pouze PZT vlákna, která generují napětí a jejich celkový objem je mnohem menší než u MFC snímače.



Obr. 56 Porovnání napětí piezokeramického snímače s MFC – úhel 90°

8.3 Zhodnocení piezokeramického snímače

Po provedených analýzách získané energie a napětí na MFC snímači a piezokeramickém snímači při průjezdu vlaku jsme získali určité hodnoty. Dále je potřeba se podívat na energetickou spotřebu vybraných zařízení, jež by mohla být aplikována pro monitoring stavu železnice. Mezi tato zařízení by se mohly řadit různé senzory, procesor na zpracování dat a bezdrátový modul, který by následně tato data odesílal na jedno místo. Na Obr. 57 můžeme sledovat energetickou spotřebu některých z těchto zařízení. Je zde například senzor vibrací, bluetooth modul a procesor ATmega328, který využívá Arduino. Tyto komponenty by právě mohly sloužit pro snímání, zpracování a odesílání dat a využít energie vytvořené pomocí piezokeramického snímače přilepeného na kolejnici. Pro srovnání jsou zde uvedeny spotřeby dalších zařízení – např. kalkulačky nebo smartphonu. Pokud by byl energetický zisk ze snímače dostatečný, nebylo by potřeba tyto komponenty napájet pomocí kabelů.



Obr. 57 Energetická spotřeba některých zařízení [10]

Když se tedy podíváme zpět do kapitoly 8.2.2, kde byl srovnáván energetický zisk piezokeramického snímače s MFC, jsou zde uvedeny i maximální hodnoty napětí a výkonu, které lze získat při průjezdu jednoho kola. Pro vhodnou konfiguraci (snímač na stojně a vlákna pod úhlem 90°) jsme byli schopni pomocí MFC snímače získat kolem $50 \mu\text{W}$ a pomocí piezokeramického snímače $5 \mu\text{W}$. Toto jsou maximální hodnoty při průjezdu pouze jednoho kola, tudíž při přejezdu celé lokomotiva bude celkový zisk energie větší, za předpokladu, že jsme schopni tuto energii uchovat.

Důležitým faktorem, který bude hrát velkou roli při zisku energie, je nastavení odporu zátěže. Generované napětí snímačem zůstává stejné, tudíž podle zvolené hodnoty odporu zátěže bude protékat určitý proud a poté budeme schopni získat na snímači tomu úměrný výkon. Úplně při všech numerických výpočtech a analýzách, které byly v této práci provedeny, byla hodnota odporu zátěže nastavena na $1 \text{ M}\Omega$. Každý piezokeramický generátor má optimální hodnotu odporu zátěže stanovenou jinak. Bylo by tudíž nutné provést výpočet závislosti získané energie na odporu zátěže, abychom pak tuto ideální hodnotu pro navržený piezokeramický generátor mohli nastavit a tím byl získaný výkon největší. Hodnota $1 \text{ M}\Omega$ je poměrně velká a je velmi pravděpodobné, že tato hodnota nebude optimální hodnotou pro navržený piezokeramický snímač, ale že se velikost optimální hodnoty bude pohybovat spíše v řádech desítek či maximálně stovek $\text{k}\Omega$.

Generované napětí na snímači bude při menším odporu zátěže o něco menší, než jaké bylo spočítáno, ale tento pokles nebude tak drastický. Proto tedy můžeme provést následující jednoduchý přepočet pro získaný výkon. Když budeme uvažovat, že optimální odpor zátěže bude $100 \text{ k}\Omega$, lze výkon, který jsme při analýzách dostali, vynásobit $10\times$ a získáme přibližnou hodnotu výkonu. Obdobně bychom postupovali, pokud bychom nastavili odpor zátěže na $50 \text{ k}\Omega$, pak bychom akorát získaný výkon vynásobili $20\times$.

Pro MFC snímač by při odporu zátěže $100 \text{ k}\Omega$ byl získaný výkon kolem $0,5 \text{ mW}$, pro $50 \text{ k}\Omega$ by pak dosahoval 1 mW . Pro v této práci navržený piezokeramický snímač by při odporu zátěže $100 \text{ k}\Omega$ byl získaný výkon kolem $50 \mu\text{W}$, pro $50 \text{ k}\Omega$ by pak dosahoval $100 \mu\text{W}$. Když se tedy podíváme na Obr. 57, kde vidíme energetickou spotřebu zařízení, která by sloužila pro bezdrátový a energeticky soběstačný monitoring železnice, tak hodnoty získaného výkonu by byly dostatečné pouze pro napájení senzoru vibrací. Pro napájení bluetooth modulu nebo procesoru by to již nestačilo, jedině za předpokladu, že by vlaková souprava měla dostatečně velké množství vagonů. Ale právě vagony mají o něco menší hmotnost, což vede k nižšímu energetickému zisku a tudíž by stále nemuselo být dosaženo energeticky soběstačného zařízení.

9 Závěr

Předkládaná diplomová práce se zabývala analýzou vhodného umístění a natočení snímače na kolejnici, kterým byl komerčně vyráběný MFC snímač od firmy Smart Materials. Jelikož se cena těchto MFC snímačů nepohybuje v nízkých hodnotách, byl navržen piezokeramický snímač, který by měl menší výrobní cenu a mohl by mít podobné energetické bilance jako MFC snímač. Následně byla provedena transientní analýza, pomocí které bylo určeno, kolik jsme schopni pomocí piezokeramického snímače získat energie a zda je dostatečná pro bezdrátový monitoring železnice v podobě snímání, zpracování a odesílání naměřených dat.

Abychom pochopili podstatu přeměny energie z mechanické na elektrickou, čehož právě využívají piezoelektrické materiály, tak je na úvod této diplomové práce zařazena kapitola popisující toto chování. Jsou zde uvedeny různé typy materiálů, které dokáží generovat napětí pomocí piezoelektrické přeměny, mezi něž patří hlavně kompozitní materiály, s nimiž se dále pracuje v hlavní části této práce. Všechny tyto materiály jsou charakterizovány určitými konstantami, z nichž ty nejdůležitější pro získ elektrické energie jsou piezoelektrické konstanty, je ale také důležité znát i mechanické vlastnosti těchto materiálů. Toto vše je popsáno v kapitole 3 této diplomové práce.

V následující 4. kapitole byla provedena rešerše různých konstrukčních řešení, jak by mohl vypadat a fungovat piezoelektrický generátor připojený na kolejnici a získávat elektrickou energii při průjezdu vlaku. Byly představeny celkem tři řešení, která byla vždy doplněna o výsledky z prováděného experimentu. Některá z řešení poskytovala i zajímavé výsledky vzhledem k získanému napětí a výkonu, avšak ty byly kompenzovány vyššími pořizovacími náklady.

Pro správné provedení analýzy umístění, natočení a velikosti snímače na kolejnici bylo důležité zvolit vhodný model snímače. K tomuto účelu bylo využito práce od Běhala [29], který provedl homogenizace MFC snímače, díky čemuž se numerický model velmi zjednodušil. V kapitole 5 je stručně popsána provedená homogenizace MFC snímače i s experimentálním ověřením hodnot. Tyto hodnoty mechanických a piezoelektrických vlastností MFC snímače byly následně využity při tvorbě numerického modelu kolejnice s přilepeným snímačem. Následuje popis numerického modelu v takovém rozsahu nutném k popisu reálného chování kolejnice, do modelu byla tedy zahrnuta dynamika kolejového lože. Dále tím, že byl uvažován ve výpočtu pouze model kolejnice mezi dvěma pražci, musely být nastaveny správné okrajové podmínky. Popisu numerického modelu byla věnována kapitola 6.1.

Stěžejní částí této diplomové práce bylo provedení série harmonických analýz při změně tří parametrů - umístění, natočení a velikosti MFC snímače. Cílem bylo zjistit dosažení maximálního získaného napětí při nastavení jednotlivých parametrů. Po provedení různých kombinací těchto parametrů byl vytvořen graf (Obr. 38), který výsledky této parametrické analýzy shrnuje. Z výsledků je patrné, že velikost MFC snímače nebude mít téměř žádný vliv na velikost maximálního získaného napětí, zatímco u ostatních parametrů tomu bude naopak. Po posouzení ještě několika dalších faktorů byla vybrána jako nejvhodnější pozice na stojně pod úhlem natočení vláken 90° . Nabízela se ještě pozice zespodu kolejnice, kde byl zisk napětí největší, avšak toto místo je těžko přístupné. Bylo tudíž rozhodnuto zvolit pozici, kde bude sice získané napětí menší, avšak se snímačem se zde mnohem lépe manipuluje.

V rámci této práce bylo provedeno i srovnání s již dříve provedeným experimentem, jehož výsledky byly poskytnuty pro zpracování. Kapitola 7 se nejprve zabývá popisem provedeného experimentu a výsledky získaného napětí na daných pozicích a natočení vláken. Poté byl numerický model naladěn na stejné parametry, jaké byly při experimentu. Zde hrají roli hlavně parametry projíždějící vlakové soupravy přes místo, kde se nachází snímač. Důležitá je tedy rychlost vlakové soupravy a také hmotnost lokomotivy, příp. vagonů. Po nastavení těchto parametrů byla provedena tranzientní analýza pro stejné pozice a natočené vláken jako při experimentu a následně srovnány výsledky získaného napětí. Porovnání numerických výsledků s experimentem je na Obr. 47. Z grafu jednoznačně plyne, že získané napětí pomocí numerického modelu dosahují velké shody s experimentálně určenými daty.

Poslední kapitola je věnována návrhu vlastního piezokeramického snímače, který bude cenově dostupnější než MFC snímač. Podle možností výrobce samotných PZT vláken byl navržen piezokeramický snímač, ve kterém se nachází 20 vláken o průměru 250 μm . Celkové rozměry snímače jsou 7 mm na šířku a délka je volitelná podle toho, jak dlouhá vlákna jsou k dispozici. Jelikož ale plocha stojny kolejnice není moc velká a při natočení vláken kolmo k zemi může být maximální délka 32 mm. Tudíž byla zvolena délka snímače 30 mm a výhodou je, že lze poté porovnat výsledky získaného napětí a výkonu s MFC snímačem. Po provedení tranzientní analýzy byly získány výsledky, ze kterých plyne, že navržený piezokeramický snímač nedosahuje zcela stejných hodnot jako MFC snímač. Pro pozici pod úhlem 0° bylo napětí a výkon poloviční, konkrétně MFC dosahoval napětí kolem 1,4 V a PZT snímač maxima necelých 0,7 V. Pro pozici pod úhlem 90° byla propast mezi oběma snímači mnohem větší, konkrétně MFC dosahoval napětí až k 7 V a PZT snímač pouze kolem 1,3 V.

Následně bylo potřeba zhodnotit, zda je získaný výkon dostačující pro napájení bezdrátového systému pro monitoring železnice. Na Obr. 57 vidíme energetickou spotřebu zařízení, které by sloužilo tomuto účelu, ale získaný výkon z obou uvedených snímačů by nebyl dostatečný. Jak velký bude celkový získaný výkon ale ovlivňuje mnoho faktorů, mezi něž hlavně patří odpor zátěže, jehož hodnota byla v této práci poměrně vysoká, a to 1 $\text{M}\Omega$. Proto je tedy vhodné zvolit konkrétní aplikaci, kdy bude známá energetická spotřeba jednotlivých zařízení, budeme také znát parametry snímače, včetně nastaveného odporu zátěže, a v neposlední řadě budou k dispozici parametry projíždějící vlakové soupravy. Prováděné analýzy v této diplomové práci nemohly obsáhnout všechny tyto proměnné parametry, ale numerický model byl vytvořen tak, že je možné většinu parametrů jednoduše měnit a pozorovat získané napětí a výkon. V případě použití jiného snímače nebo snímače jiné velikosti je však nutné upravit model kolejnice a v případě jiné rychlosti vlaku přepočítat časový krok. I přesto, že získaná energie ze snímačů není příliš velká, je jejich aplikace pro monitoring železnice možná.

Na tuto diplomovou práci je možné navázat několika způsoby. V první řadě jsou zde pouze numerické výsledky navrženého piezokeramického snímače, tudíž se nabízí možnost nechat navržený piezokeramický snímač vyrobit a provést experiment pro validaci numerického modelu. Za druhé tento snímač a také i MFC snímač nedokázaly vytvořit potřebné množství výkonu pro napájení bezdrátového systému pro monitoring, tudíž by mohl být tento snímač zdokonalen, případně by mohlo být zváženo použití více snímačů. Pokud bychom se vzdálili od aplikace na kolejnici, lze také zvážit použití navrženého piezokeramického snímače a případně i MFC snímač v jiných aplikacích.

Seznam použité literatury

- [1] Piezo Film Sensors with Lead. In: *TE Connectivity* [online]. [cit. 2020-02-03]. Dostupné z: <https://www.te.com/usa-en/product-CAT-PFS0005.html?q=&n=129691&type=products&samples=N&inStoreWithoutPL=false&instock=N>
- [2] JANÍČEK, Přemysl. *Systémové pojetí vybraných oborů pro techniky: hledání souvislostí*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. ISBN 978-80-7204-554-9.
- [3] TICHÝ, Jan, Jiří ERHART, Erwin KITTINGER a Jana PŘÍVRATSKÁ. *Fundamentals of Piezoelectric Sensorics: Mechanical, Dielectric, and Thermodynamical Properties of Piezoelectric Materials*. Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. ISBN 978-3-540-43966-0.
- [4] KHOLKIN, Andrei. Piezoelectricity and Crystal Symmetry. *Piezoelectric and Acoustic Materials for Transducer Applications*. Springer US, 2008, s. 17-38. DOI: 10.1007/978-0-387-76540-2_2.
- [5] MASON, Warren Perry. Piezoelectricity, its history and applications. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1981, **70**(6). DOI: 10.1121/1.387221.
- [6] SUTHAR Dipak. What is Piezoelectric effect? In: *Electricalidea* [online]. 2016 [cit. 2020-02-04]. Dostupné z: <http://www.electricalidea.com/what-is-piezoelectric-effect/>
- [7] PATEL, Imran. Ceramic Based Intelligent Piezoelectric Energy Harvesting Device. *Advances in Ceramics: Electric and Magnetic Ceramics, Bioceramics, Ceramics and Environment*. InTech, 2011. DOI: 10.5772/19189.
- [8] VIJAYA, M. S. *Piezoelectric Materials and Devices: Applications in Engineering and Medical Sciences*. New York: CRC Press Taylor & Francis, 2013. ISBN 978-1-4398-8788-2.
- [9] MACHŮ, Zdeněk. *Výpočtové modelování piezoelektrických vrstevnatých kompozitů a analýza jejich elektro-mechanické odezvy při harmonickém kmitání*. Brno, 2019. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Ing. Oldřich Ševeček, Ph.D.
- [10] ZAPLETAL, Vít. *Analýza SMART zdrojů elektrické energie pro železniční dopravu*. Brno, 2018. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.
- [11] YANG, Zhengbao a Jean ZU. Comparison of PZN-PT, PMN-PT single crystals and PZT ceramic for vibration energy harvesting. *Energy Conversion and Management*. 2016, **122**, 321-329. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.05.085>
- [12] SAPPATI, Kiran Kunar a Sharmistha BHADRA. Piezoelectric Polymer and Paper Substrates: A Review. *Sensors*. 2018, **18**(11). DOI: 10.3390/s18113605.
- [13] HEHN, Thorsten a Yiannos MANOLI. *CMOS Circuits for Piezoelectric Energy Harvesters*. Dordrecht: Springer, 2015. ISBN 978-94-017-9287-5.

- [14] Soft vs. Hard Ceramics. *APC International* [online]. 2016 [cit. 2020-02-05]. Dostupné z: <https://www.americanpiezo.com/piezo-theory/ceramics.html>
- [15] DERAEMAEKER, Arnaud a Houssein NASSER. Numerical evaluation of the equivalent properties of Macro Fiber Composite (MFC) transducers using periodic homogenization. *International Journal of Solids and Structures*. 2010, **47**(24), 3272-3285. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2010.08.006.
- [16] PREUMONT, André. Modeling of piezoelektric composite transducers. *Active Structures Laboratory* [online]. 2011 [cit. 2020-02-13]. Dostupné z: <https://scmero.ulb.ac.be/project.php?id=10&page=index.html>
- [17] WILKIE, William Keats. NASA MFC Piezocomposites: A Development History. In: *Smart Material* [online]. 2005 [cit. 2020-02-06]. Dostupné z: <https://www.smart-material.com/media/Presentations/K-Wilkie-ISMA-2005.pdf>
- [18] LIN, Xui-juan, Ke-chao ZHOU, Xiao-yong ZHANG a Dou ZHANG. Development, modeling and application of piezoelectric fiber composites. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2012, **23**(1), 98-107. DOI: 10.1016/S1003-6326(13)62435-8.
- [19] ANSI/IEEE STD 176-1987. *IEEE Standard on Piezoelectricity*. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1988.
- [20] Piezoelectric Constants. *APC International* [online]. 2016 [cit. 2020-02-17]. Dostupné z: <https://www.americanpiezo.com/piezo-theory/piezoelectric-constants.html>
- [21] Piezoelectric Tutorial. *Thorlabs* [online]. 1999 [cit. 2020-02-17]. Dostupné z: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=5030
- [22] YANG, Zhengbao, Shengxi ZHOU, Jean ZU a Daniel INMAN. High-Performance Piezoelectric Energy Harvesters and Their Applications. *Joule*. 2018, **2**(4), 642-697. DOI: 10.1016/j.joule.2018.03.011.
- [23] ANSYS Inc. *Coupled-Field Analysis Guide: 2.3 Piezoelectric Analysis*. ANSYS Help. Release 2019 R3.
- [24] ANSYS Inc. *Theory Reference: 10.5. Piezoelectrics*. ANSYS Help. Release 2019 R3.
- [25] GAO, M. Y., P. WANG, Y. CAO, R. CHEN a C. LIU. A rail-borne piezoelectric transducer for energy harvesting of railway vibration. *Journal of Vibroengineering*. 2016, **18**(7), 4647-4663. DOI: 10.21595/jve.2016.16938.
- [26] WANG, Jianjun, Zhifei SHI, Hongjun XIANG a Gangbing SONG. Modeling on energy harvesting from a railway system using piezoelectric transducers. *Smart Materials and Structures*. 2015, **24**(10), 105017. DOI: 10.1088/0964-1726/24/10/105017.
- [27] TIANCHEN, Yuan, Yang JIAN, Song RUIGANG a Liu XIAOWEI. Vibration energy harvesting system for railroad safety based on running vehicles. *Smart Materials and Structures*. 2014, **23**(12), 125046. DOI: 10.1088/0964-1726/23/12/125046.
- [28] Smart Material Corporation. [online katalogový list]. *MACRO FIBRE COMPOSITE - MFC: Actuator, Sensor, Energy Harvester Energy Harvesting Systems Piezo Powering and Instrumentation Engineering Services*. 2019 [cit. 2020-04-16]. Dostupné z: https://www.smart-material.com/media/Datasheets/MFC_V2.4-datasheet-web.pdf

- [29] BĚHAL, Josef. *Integrace SMART materiálu do mechanické konstrukce*. Brno, 2019. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.
- [30] KŠICA, Filip, Josef BĚHAL, Ondřej RUBEŠ a Zdeněk HADAŠ. Homogenized Model of Piezoelectric Composite Structure for Sensing Purposes. R., Szewczyk a et al. (Eds.). *Mechatronics 2019: Recent Advances Towards Industry 4.0*. Springer Nature, 2019, s. 358-365. DOI: 10.1007/978-3-030-29993-4_44. ISBN 978-3-030-29993-4.
- [31] ANSYS Inc. *Theory Reference: 13. Element Library*. ANSYS Help. Release 2019 R3.
- [32] KRAJČOVIČ, Marián. *Železniční stavitelství (příprava přednášek)*. Katedra dopravního stavitelství Fakulta stavební VŠB-TU Ostrava. Ostrava, 2006.
- [33] MOJŽÍŠEK, Dominik. *Dynamická analýza koleje*. Brno, 2018. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav železničních konstrukcí a staveb. Vedoucí práce doc. Ing. Otto Plášek, Ph.D.
- [34] Rail 60E1 / UIC 60. *ArcelorMittal* [online]. 2006 [cit. 2020-05-19]. Dostupné z: <https://rails.arcelormittal.com/types-rails/transport-rails/european-standards/rail-uic60-60e1>
- [35] Lokomotivní řady 363 (ES 499.1). *Atlas lokomotiv* [online]. 2004 [cit. 2020-06-12]. Dostupné z: <http://www.atlaslokomotiv.net/loko-363.html>
- [36] Order & Pricing. *Smart Materials* [online]. 2003 [cit. 2020-06-19]. Dostupné z: <https://www.smart-material.com/Ordering/DE-OrderOverview.html>

Seznam obrázků

Obr. 1 Příklad piezoelektrického senzoru [1]	10
Obr. 2 Princip přímého piezoelektrického jevu u krystalu křemene [6]	14
Obr. 3 Orientace elektrických dipólů (a) s náhodným uspořádáním, (b) během polarizace, (c) po polarizaci [7]	15
Obr. 4 Vliv Curieho teploty na polarizaci piezokeramiky [7]	15
Obr. 5 Příklad MFC aktuátoru [17].....	18
Obr. 6 Struktura piezokeramického kompozitu [15] [16].....	19
Obr. 7 Způsob výroby MFC kompozitu [17]	20
Obr. 8 Základní značení směrů [20].....	20
Obr. 9 Základní módy namáhání piezokeramické látky [21].....	20
Obr. 10 Změna zadávání piezoelektrické a elastické matice z IEEE standardu do formátu ANSYS [9]	24
Obr. 11 (a) Poloha a velikost generátoru vzhledem k nápravě (b) Detailní pohled na připevněný generátor [25]	25
Obr. 12 Napětí piezoelektrického generátoru v závislosti na dané konfiguraci [25].....	26
Obr. 13 (a) Umístění generátoru pod kolejnicí (b) Detailní pohled na generátor [26] ..	27
Obr. 14 Časový průběh napětí a výkonu [26]	27
Obr. 15 Vliv rychlosti na výstupní napětí a výkon [26].....	28
Obr. 16 Konstrukce drum piezoelektrického generátoru [27]	28
Obr. 17 Umístění generátoru pod pražcem [27].....	29
Obr. 18 Výsledky analytického výpočtu výstupního napětí a výkonu [27]	29
Obr. 19 Vnitřní struktura MFC kompozitu [29].....	30
Obr. 20 Elementární buňka MFC (rozměry v μm) [29]	31
Obr. 21 Geometrie nosníku použitá pro MKP model (rozměry v mm) [30]	32
Obr. 22 Porovnání napětí v závislosti na odporu pro $f = 19,8 \text{ Hz}$ [29].....	33
Obr. 23 Porovnání napětí v závislosti na odporu pro $f = 165,4 \text{ Hz}$ [29]	33
Obr. 24 Porovnání napětí v závislosti na odporu pro $f = 120,5 \text{ Hz}$ [29]	33
Obr. 25 Element SOLID226 [31].....	34
Obr. 26 Element CIRCU94 [31]	35
Obr. 27 Element MASS21 [31].....	35
Obr. 28 Element COMBIN14 [31].....	36

Obr. 29 Dynamický model kolejového svršku	37
Obr. 30 Model geometrie a umístění MFC snímačů	38
Obr. 31 Rozměry kolejnice UIC 60 [34]	39
Obr. 32 Lokální souřadnicové systémy	40
Obr. 33 Okrajové podmínky	41
Obr. 34 První vlastní tvar kmitání kolejnice – 256 Hz	42
Obr. 35 Porovnání výsledků harmonické analýzy pro pozici 1	43
Obr. 36 Porovnání výsledků harmonické analýzy pro pozici 2	44
Obr. 37 Porovnání výsledků harmonické analýzy pro pozici 3	44
Obr. 38 Porovnání výsledků harmonické analýzy jednotlivých konfigurací MFC snímače pro první vlastní tvar kmitání kolejnice (256 Hz)	45
Obr. 39 Vhodná konfigurace MFC snímače	46
Obr. 40 Rozmístění snímačů při experimentu	47
Obr. 41 Výsledky 1. měření experimentu	48
Obr. 42 Výsledky 2. měření experimentu	48
Obr. 43 Lokomotiva řady 363 - rozměry [35]	49
Obr. 44 Místa zadávání sil při tranzientní analýze	50
Obr. 45 Výsledky tranzientní analýzy pro stejné pozice MFC snímače jak při experimentu	51
Obr. 46 Vliv rychlosti vlaku	52
Obr. 47 Porovnání experimentu s numerickým modelem	53
Obr. 48 Výsledky napětí pro vhodnou konfiguraci MFC snímače	54
Obr. 49 Získané napětí [V] na MFC snímači	54
Obr. 50 Navržená struktura piezokeramického snímače (rozměry v μm)	55
Obr. 51 Síť elementů piezokeramického snímače	57
Obr. 52 Výsledky tranzientní analýzy piezokeramického snímače – úhel 0°	57
Obr. 53 Výsledky tranzientní analýzy piezokeramického snímače – úhel 90°	58
Obr. 54 Získané napětí [V] na piezokeramického snímači – úhel 90°	58
Obr. 55 Porovnání napětí piezokeramického snímače s MFC – úhel 0°	59
Obr. 56 Porovnání napětí piezokeramického snímače s MFC – úhel 90°	60
Obr. 57 Energetická spotřeba některých zařízení [10]	61

Seznam tabulek

Tab. 1 Aplikace piezoelektrických materiálů v oblasti průmyslového inženýrství [8]..	16
Tab. 2 Piezoelektrické vlastnosti některých piezoelektrických materiálů [22].....	23
Tab. 3 Porovnání simulačních a experimentálních výsledků [27]	29
Tab. 4 Materiálové vlastnosti homogenizovaného MFC [29].....	31
Tab. 5 Parametry kolejového svršku [33]	37
Tab. 6 Materiálové vlastnosti [29]	38
Tab. 7 Výsledky modální analýzy	42
Tab. 8 Nastavení parametrů tranzientní analýzy	50
Tab. 9 Materiálové vlastnosti [29]	56

Seznam použitých symbolů, veličin a zkratek

AFC	Active Fiber Composite	
FSI	Fakulta strojního inženýrství	
LS	Loadstep	
MFC	Macro Fiber Composite	
MIT	Massachusetts Institute of Technology	
MKP	metoda konečných prvků	
NASA	National Aeronautics and Space Administration	
PZT	olovo-zirkonát-titanát (ang. lead zirconate titanate)	
SS	Substep	
VUT	Vysoké učení technické	
D_i	elektrická indukce	$[\text{C} \cdot \text{m}^{-2}]$
d_{ij}	nábojová konstanta	$[\text{C} \cdot \text{N}^{-1}]$
E	výstupní energie	$[\text{J}]$
E_{ij}	Youngův modul pružnosti	$[\text{Pa}]$
E_i	intenzita elektrického pole	$[\text{V} \cdot \text{m}^{-1}]$
$E_i^{\text{elekt.}}$	výstupní elektrická energie	$[\text{J}]$
$E_j^{\text{mech.}}$	vstupní elektrická energie	$[\text{J}]$
F	síla	$[\text{N}]$
f	frekvence	$[\text{Hz}]$
G_{ij}	Youngův modul pružnosti ve smyku	$[\text{Pa}]$
g_{ij}	napětíová konstanta	$[\text{Vm} \cdot \text{N}^{-1}]$
K	dielektrická konstanta	$[-]$
k_{ij}	koeficient elektromechanické vazby	$[-]$
P, P_{p-p}	výstupní výkon	$[\text{W}]$
P_{RMS}	střední hodnota výstupního výkonu	$[\text{W}]$
Q_m	mechanický činitel jakosti	$[-]$
R_C	odpor elektrické zátěže	$[\Omega]$
S_i	mechanické přetvoření	$[-]$
s_{ij}	elektrická poddajnost	$[\text{Pa}^{-1}]$
T_C	Curieho teplota	$[\text{°C}]$ nebo $[\text{K}]$
T_i	mechanické napětí	$[\text{Pa}]$
U, U_{p-p}	výstupní napětí	$[\text{V}]$
U_{RMS}	střední hodnota výstupního napětí	$[\text{V}]$
v	rychlost	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$

ε_0	permitivita vakua	$[\text{F}\cdot\text{m}^{-1}]$
ε_{ij}	absolutní permitivita	$[\text{F}\cdot\text{m}^{-1}]$
ε_r	relativní permitivita	$[-]$
Δs	délka	$[\text{m}]$
Δt	časový krok	$[\text{s}]$
μ	Poissonovo číslo	$[-]$

Přílohy

Všechny přílohy jsou přiloženy na flash disku, příp. nahrány jako příloha této práce v systému. V každé z uvedených označených složek jsou vždy soubory, které se týkají dané analýzy, příp. porovnání. Soubory pro výpočet v Ansysu jsou ve formátu *.mac* a lze je jednoduše spustit. Tam kde se nachází makra jsou také soubory ve formátu *.sab*, což je upravený model kojenice ve SpaceClaim přímo pro danou konfiguraci snímače. Poté jsou zde výsledky numerických výpočtů, které jsou exportovány z Ansysu ve formátu *.txt*, následně z nich byla odstraněna hlavička, aby se dali nahrát do Matlabu. Dalším souborem nacházejícím se ve složkách je soubor ve formátu *.m*, který lze spustit v Matlabu a slouží k vykreslení výsledků do grafů.

Struktura:

- A1 – Modal
- A2 – Harmonic
 - A21 – Harmonic_mfc_28x7
 - A211 – Harmonic_mfc_28x7_pos1
 - A212 – Harmonic_mfc_28x7_pos2
 - A213 – Harmonic_mfc_28x7_pos3
 - A214 – Harmonic_mfc_28x7_comparison
 - A22 – Harmonic_mfc_28x14
 - A221 – Harmonic_mfc_28x14_pos1
 - A222 – Harmonic_mfc_28x14_pos2
 - A223 – Harmonic_mfc_28x14_pos3
 - A224 – Harmonic_mfc_28x14_comparison
 - A23 – Harmonic_mfc_comparison
- A3 – Transient
 - A31 – Transient_mfc
 - A311 – Transient_mfc_28x7_pos1
 - A3111 – Transient_mfc_28x7_pos1_0_comparison_velocity
 - A3112 – Transinet_mfc_28x7_pos1_0_comparison_experiment
 - A312 – Transient_mfc_28x7_pos2
 - A313 – Transient_mfc_28x7_pos3
 - A32 – Transient_pzt
 - A321 – Transient_pzt_pos1_0_30mm
 - A322 – Transient_pzt_pos1_0_50mm
 - A323 – Transient_pzt_pos1_0_75mm
 - A324 – Transient_pzt_pos1_0_comparison
 - A325 – Transient_pzt_pos1_90_30mm
 - A33 – Transient_comparison_mfc_pzt